

15

# KIELER MEERESFORSCHUNGEN

Institut für Meereskunde an der Universität Kiel

---

Band XXVI

1970

Heft 1

---

Sonderdruck S. 21—42

## Tiefwasser-Verankerungssysteme des Instituts für Meereskunde Kiel

Technischer Bericht

Von GEROLD SIEDLER und GEVEHART GRASSHOFF

---

Kommissionsverlag Walter G. Mühlau, Kiel

## Tiefwasser-Verankerungssysteme des Instituts für Meereskunde Kiel

Technischer Bericht

Von GEROLD SIEDLER und GEVEHART GRASSHOFF

**Zusammenfassung:** Nach mehrjährigen Erfahrungen mit Tiefwasser-Verankerungssystemen wurde 1968/69 am Institut für Meereskunde Kiel eine technische Entwicklung mit dem Ziel durchgeführt, die Zuverlässigkeit solcher Systeme zu erhöhen. Im vorliegenden Bericht werden der Aufbau der Systeme und die Überlegungen zur Sicherung gegen Verluste beschrieben. Auslege- und Aufnahmeverfahren sowie die Anforderungen an Verankerungsseile und die dazu durchgeführten Testversuche werden dargestellt. Außerdem enthält der Bericht eine Zusammenstellung einfacher Formeln und Diagramme zur Berechnung des statischen Verhaltens von Verankerungssystemen.

**Deep-Sea Moorings of the Institut für Meereskunde Kiel, technical report (Summary):**  
A development of deep-sea moorings was carried out in 1968/69 at the Institut für Meereskunde Kiel, based on mooring experiences obtained during the preceding years. The objective was to obtain a better mooring performance and a higher recovery rate. Six of the resulting new moorings have been used for six weeks during the Norwegian Sea Experiment in 1969 and were recovered successfully. This report describes the mooring design and the corresponding test experiments. It also presents simple formulas and diagrams which can be used for the design of moorings. The results are presented in the following order:

1. Introduction  
General considerations are given regarding the required type of oceanographic measurement.
2. Mooring system
- 2.1. Basic system  
A subsurface type mooring is proposed for an approximate depth range of 200 to 2000 meters. The mooring length can easily be extended for greater depths. The relevance of the applied launching and recovery techniques to the mooring design is discussed. The basic schematic of the mooring is shown (fig. 1).
- 2.2. Security from loss by cable breaking  
A discussion of possible effects of cable breaking leads to a mooring design with buoyancy elements distributed in a certain manner along the cable. Buoyancy elements with plastic spheres and with synthetic foam materials are shown (figs. 2 and 3), and some test results of the plastic spheres are described.
- 2.3. Releases and weak links  
A release system using an acoustic receiver/transmitter unit and two additional time releases for improved reliability is described (fig. 4). A weak link for emergency recovery is shown (fig. 6).
- 2.4. Positioning of the mooring  
Acoustic and radio beacons are employed (figs. 4 and 5).
- 2.5. Cable connections and corrosion protection  
Typical connections are shown (fig. 7).
- 2.6. Typical mooring  
A mooring designed along the lines discussed in the preceding text is presented in detail (fig. 8).
3. Launching and recovery techniques  
The mooring cables are wound on special winch drums ashore (fig. 9) similar to the technique used at the Woods Hole Oceanographic Institution. The cables are payed out at sea from a winch mounted permanently aboard the research vessel. The procedure for attaching instruments and buoyancy elements in the line is described (fig. 10). Styrofoam floats with corrosive link connections (fig. 11) are fastened to the cable during the launching process to avoid kinking. A schematic presentation of the launching and recovery procedures is given (figs. 12 and 13).
4. Results of mooring cable tests
- 4.1. Experiences with mooring cables  
Possible reasons for cable breaks early in the program are discussed.

- 4.2. General requirements for a new cable  
For an improved cable, a compromise between the following requirements is necessary: Small diameter, high strength, corrosion protection, torque-balanced under load, and small weight. The applicability of stranded and plaited cables is discussed.
- 4.3. Summary of technical data of a new type of cable  
The data for two types of steel cable are summarized.
- 4.4. Coating requirements  
The requirements for the mechanical properties of a plastic cable coating are stated.
- 4.5. Cable terminations requirements  
The requirements for the terminations are discussed with respect to corrosion protection and mooring vibration.
- 4.6. Summary of commercially available cables  
Table 3 gives a summary of cables that were suggested for use in deep-sea moorings by German manufacturers.
- 4.7. Torque balance test  
Torque balance test results for cables no. 1 and 3 of table 3 are described.
- 4.8. Breaking test  
Results of breaking tests under static load for the above cables are presented.
- 4.9. Coating test  
Results of qualitative tests of the coating for the above cables are described.
- 4.10. Test of cable terminations  
Tests of the water-proofness of the selected cable connections under high pressures (table 5) and cyclic tension tests are described.
- 4.11. Type and tests of specially manufactured cables  
To obtain an improvement with respect to torque-balance, nine samples of special cables were manufactured (tables 6 and 7). Type no. IX was selected for use in the moorings (table 8). A colour code was applied for cable length identification (table 9).
5. Determination of the balance of forces at moorings
- 5.1. Forces acting on the moorings in currents  
The vector diagram of forces acting on a rigid mooring is drawn (fig. 14), the formulas are given.
- 5.2. Reynolds Number and drag coefficient  
The numerical values of Reynolds Numbers and drag coefficients are discussed.
- 5.3. Drag force  
All drag forces are reduced to the uppermost buoyancy element, and formulas (equ. 5 and 8) are given for arrays of instruments and buoyancy elements distributed arbitrarily or equidistantly along the line.
- 5.4. Drag forces for different current profiles with constant current direction.
- 5.4.1. Constant current  
The total drag force for equidistant arrays in a current which is constant with depth is calculated (equ. 12).
- 5.4.2. Current decreasing linearly with depth to zero  
The total drag force for equidistant arrays in a current decreasing linearly from  $V_0$  at the surface to zero at the bottom is calculated (equ. 17).
- 5.4.3. Required effective buoyancy  
Diagrams are computed presenting the required effective buoyancy as a function of mooring length for selected values of the current velocity (figs. 16, 17, and 18).

## 1. Einleitung

Für die Untersuchung der Veränderlichkeit physikalischer Größen im Meere benötigt man über lange Zeit wiederholte Messungen an festen Punkten. Dafür eignen sich Verankerungssysteme mit selbstregistrierenden Meßgeräten oder Meßsysteme mit einer Sendeboje zur Datenfernübertragung. Eine Meßwertübertragung muß dort angewandt werden, wo die Daten sofort für Vorhersagezwecke verwendet werden sollen, während eine Registrierung im Verankerungssystem für die Grundlagenforschung wegen des geringeren Aufwandes im allgemeinen vorzuziehen ist.

Die Erfahrung zeigt, daß es schwierig ist, derartige Verankerungssysteme über viele Monate störungsfrei auf Position zu halten. Ein besonderes Problem bei der technischen



Entwicklung besteht darin, daß die Ursachen für die oft hohen Verlustraten nur in Ausnahmefällen direkt festgestellt werden können. Ein Teil der Verluste wird durch Einwirkung von fremden Schiffen verursacht. Dagegen bestehen nur begrenzte Abwehrmöglichkeiten, weil internationale Vereinbarungen zum rechtlichen Schutz von auf hoher See verankerten wissenschaftlichen Geräten noch fehlen. Viele Verluste haben jedoch technische Gründe: sie werden zum Beispiel verursacht durch Materialermüdung, Korrosion und Materialüberlastung von Teilen des Verankerungssystems.

Ozeanographische Untersuchungen zeigen die Notwendigkeit, eine hohe räumliche Auflösung mit Verankerungssystemen zu erreichen. Das führt zu der Forderung nach einer möglichst großen Zahl von Meßgeräten in einer Verankerung wie auch nach einer großen Zahl von Verankerungssystemen. Der beträchtliche Wert der Meßgeräte rechtfertigt dann einen gesteigerten Aufwand bei der Verankerungstechnik mit dem Ziel, eine Verlustrate von nur wenigen Prozent zu erhalten.

Am Institut für Meereskunde Kiel wurde deshalb 1968—1969 eine systematische Entwicklung von Tiefwasser-Verankerungssystemen durchgeführt. Die daraus entstandenen Systeme wurden im Herbst 1969 während der Expedition „Norwegische See 1969“ erfolgreich eingesetzt. Als wichtige Basis dieser technischen Entwicklung konnten Erfahrungen verwertet werden, die seit 1964 bei Tiefwasserverankerungen am Institut für Meereskunde Kiel (SIEDLER 1967, 1968) sowie auf dem Forschungsschiff „Meteor“, im Deutschen Hydrographischen Institut und in der Woods Hole Oceanographic Institution/U.S.A. (BERTEAUX and WALDEN 1968, BERTEAUX 1968, BERTEAUX and WALDEN 1969, FOFONOFF and GARRET 1968, HEINMILLER 1968, MILLARD 1969) gewonnen worden waren. Der vorliegende Bericht beschreibt den Aufbau der Systeme und Testversuche zu Einzelteilen, ferner stellt er einige einfache Formeln und Diagramme zusammen, die beim Entwurf von Verankerungssystemen benutzt werden können.

## 2. Aufbau der Verankerungssysteme

### 2.1. Grundsätzlicher Aufbau

Bei den jetzt entwickelten Tiefwasser-Verankerungssystemen handelt es sich um den Typ der Unterwasser-Verankerung („subsurface mooring“), bei der die Meßgeräte durch Auftriebskörper unter der Meeresoberfläche getragen werden. Eine Reihe der folgenden Überlegungen lassen sich jedoch analog auch bei einer Oberflächen-Verankerung („surface mooring“) anstellen.

Bei der Konstruktion von Verankerungssystemen ist es zweckmäßig, drei Tiefenbereiche zu unterscheiden. Im Flachwasser bis 200 m sind meist Oberflächen-Verankerungen oder Grundlinien-Verankerungen vorzuziehen, die Gewichte der Ankerseile spielen keine wesentliche Rolle. Für sehr große Tiefen über etwa 2000 m wird bei Verwendung von Stahlseilen das Gewicht der Drähte so groß, daß ungünstige Werte für den erforderlichen Auftrieb resultieren. Hier ist die Verwendung von Kunststoffseilen zumindest im tiefen Bereich angebracht. Die im folgenden diskutierten Verankerungssysteme wurden für einen mittleren Tiefenbereich vorgesehen, also für etwa 200 bis 2000 m. Sie können jedoch ohne grundsätzliche Änderung für größere Einsattiefen verwendet werden, wenn im tieferen Bereich Seile aus Kunststoff anstelle der Stahlseile vorgesehen werden.

Der Aufbau eines Verankerungssystems wird entscheidend mitbestimmt durch die Methode des Auslegens und Aufnehmens. Die traditionelle Methode, den Anker zuerst zu Wasser zu geben und dann nach und nach das übrige System zu fieren, hat den schwerwiegenden Nachteil, daß während des gesamten Auslegevorganges eine hohe Zugbelastung auftritt. Sie kann durch Schiffsbewegungen infolge des Seegangs ein Mehr-



faches des jeweiligen effektiven Gewichts des im Wasser befindlichen Systemteils betragen (SIEDLER 1962). Noch ungünstiger werden die Verhältnisse beim Aufnehmen, wenn nach der traditionellen Methode der Anker aus dem Grund gezogen werden muß.

Beginnt man dagegen beim Auslegen mit dem oberen Teil des Verankerungssystems und slipt den Anker zum Schluß, so treten nur beim Fallen des Ankers für relativ kurze Zeit hohe Zugbelastungen auf (vgl. BERTEAUX und WALDEN 1969). Trennt man ferner zur Aufnahme das System vom Anker, so lassen sich hohe Belastungen bei diesem Arbeitsgang vollständig vermeiden. Diese Auslege- und Aufnahmetechnik verringert also entscheidend das Verlustrisiko. Außerdem erlaubt sie die mehrmalige Verwendung von Verankerungsseilen. Diese Technik wurde deshalb bei den im folgenden beschriebenen Verankerungssystemen vorgesehen.

Das Prinzip einer solchen Verankerung zeigt Abb. 1. Ein Auftriebselement unter der Meeresoberfläche trägt die Meßgeräte in verschiedenen Tiefen. Über dem Anker befindet sich eine Auslösevorrichtung, die zum Aufnahmezeitpunkt den Anker vom übrigen System abtrennt.

Auf der Grundlage dieses Schemas wurde ein Verankerungssystem entwickelt, bei dem zur Herabsetzung des Verlustrisikos mehrfache Sicherungen gegen Verankerungsschäden im Aufbau vorgesehen sind.

## 2.2 Sicherungen bei Bruch von Seilen

Bricht bei einem Aufbau in der einfachen Form nach Abb. 1 das Seil oder ein Verbindungsstück, so schwimmt der über der Bruchstelle liegende Teil des Systems auf und vertreibt, geht also mit großer Wahrscheinlichkeit verloren. Der unter der Bruchstelle liegende Teil fällt auf den Meeresboden und ist auch durch Betätigen der Auslösevorrichtung nicht mehr zurückzugewinnen. Außerdem ist eine Aufnahme vom Boden mit einem geschleppten Suchgeschirr in diesem Falle praktisch aussichtslos. Verteilt man dagegen den Auftrieb durch eine passende Anordnung von mehreren Auftriebselementen in verschiedenen Tiefen so, daß bei Bruch des Seils durch die verbleibenden Elemente des Restverankerungssystems ein effektiver Auftrieb bestehen bleibt, so kann dieser Teil der Verankerung mit Hilfe der Auslösevorrichtung zum Aufschwimmen gebracht werden. Als Auftriebselemente wurden grundsätzlich keine einfachen Hohlkörper verwendet, weil bei einer Undichtigkeit der gesamte Auftrieb dieses Elements verloren geht. Nach der beim Deutschen Hydrographischen Institut seit langem üblichen Methode wurden eine größere Zahl von Fischnetzkgeln zu je einem Auftriebselement zusammengefügt, allerdings in anderer Anordnung und mit einem neuen Kugeltyp. Diese Anordnung hat

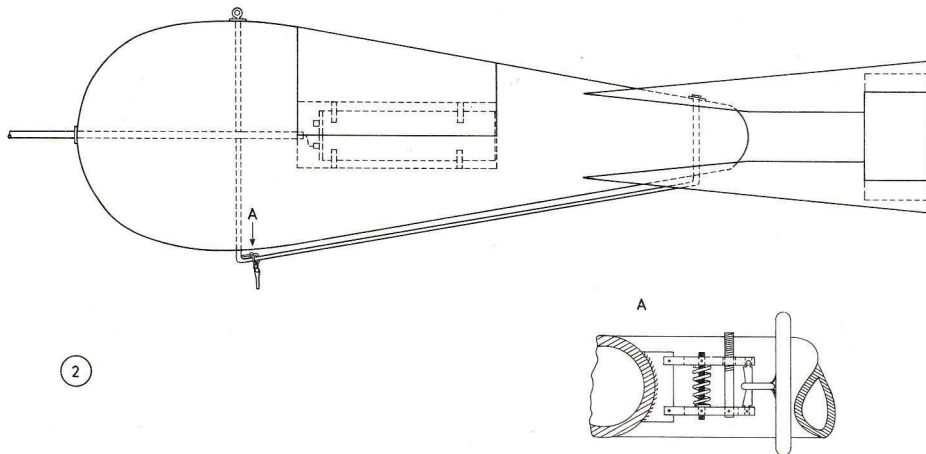
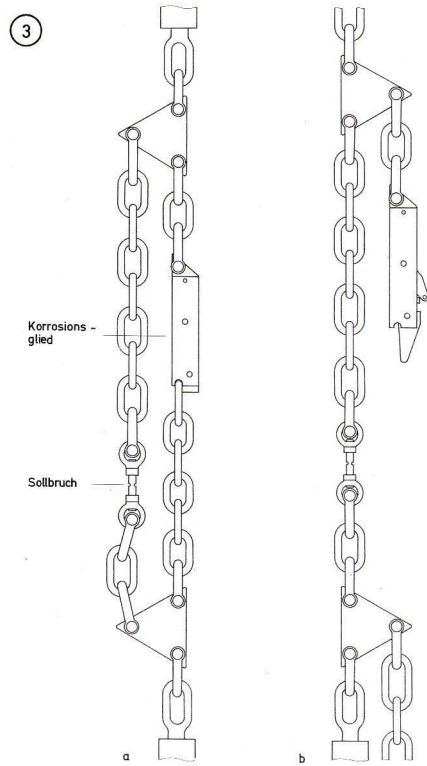
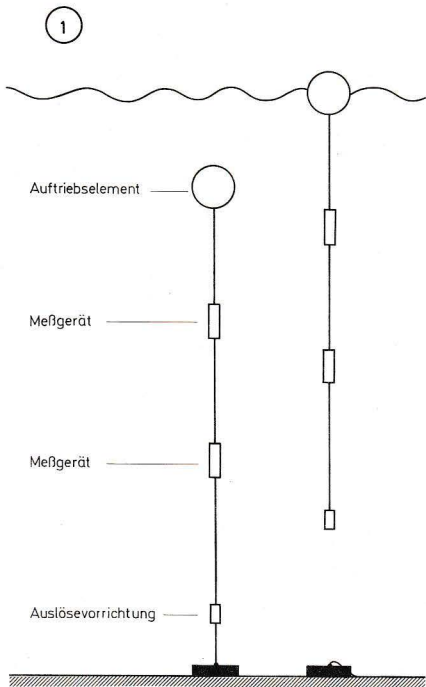
---

### Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 1)

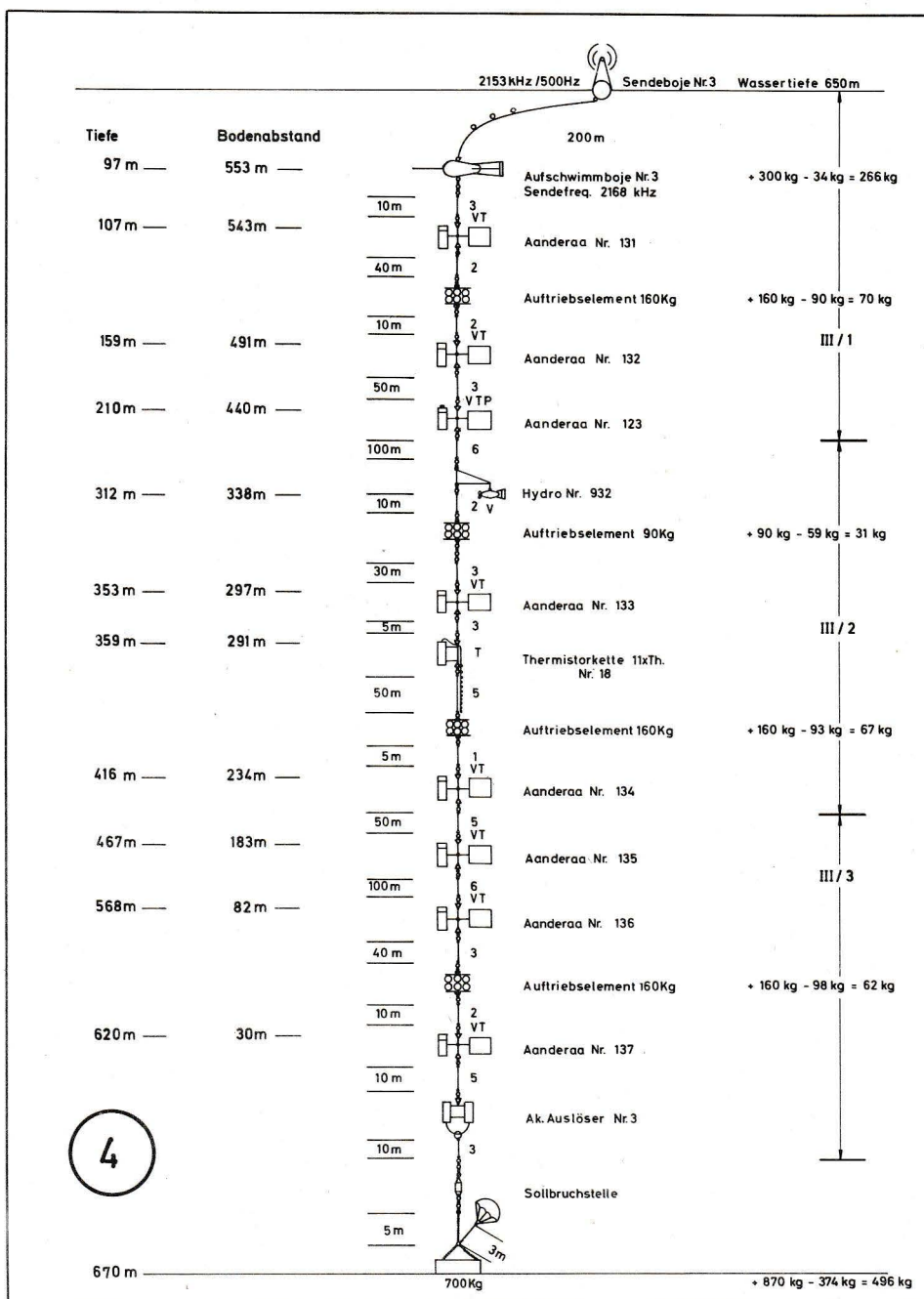
- Abb. 1: Schematische Darstellung eines Unterwasser-Verankerungssystems, bei dem zur Aufnahme der Anker vom Meßsystem gelöst wird.  
Abb. 2: Auftriebselement aus druckfestem Schaumstoff mit Aufhängevorrichtung mit Korrosionsglied-Zeitauslöser für horizontale und vertikale Einstellung und druckschaltergesteuertem Funkpeilsender.  
Abb. 3: Sollbruchanordnung mit Korrosionsglied zur Überbrückung der Sollbruchstelle während des Auslegens des Verankerungssystems: (a) beim Auslegen, (b) nach dem Auslegen.
- 

### Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 3)

- Abb. 5: Auftriebselemente aus Aluminium-Rahmen mit Stahlzugstange und Kunststoffkgeln für einen Auftrieb von 90 bzw. 160 kp.  
Abb. 6: Auslöser, bestehend aus einem Auslösegerät mit akustischem Empfänger, Pinger und Zeitsteuerung und einem Auslösegerät mit Zeitsteuerung.  
Abb. 7: Oberflächen-Funkpeilboje mit automatischer Antennenabstimmung.

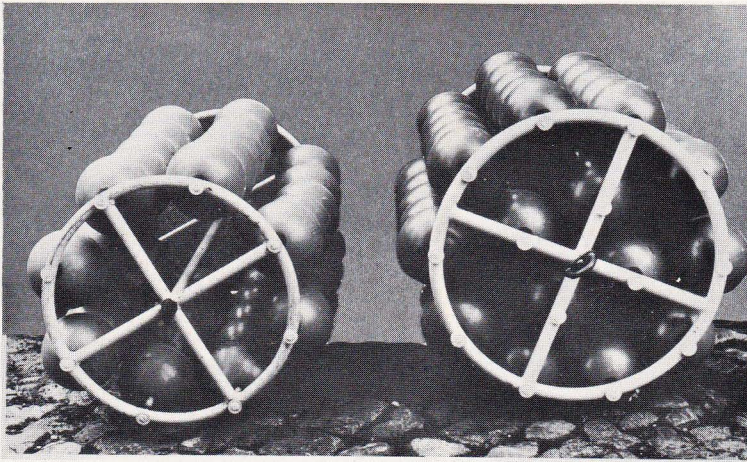


Tafel 1 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)

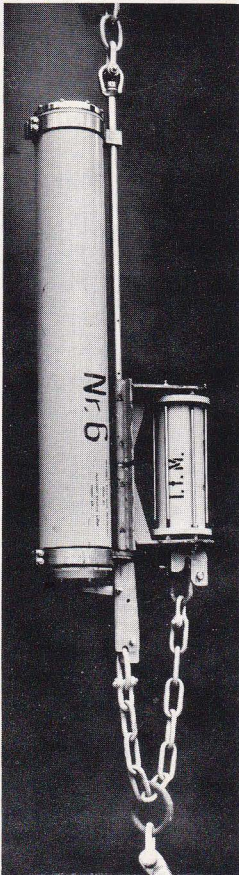


Tafel 2 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)





5



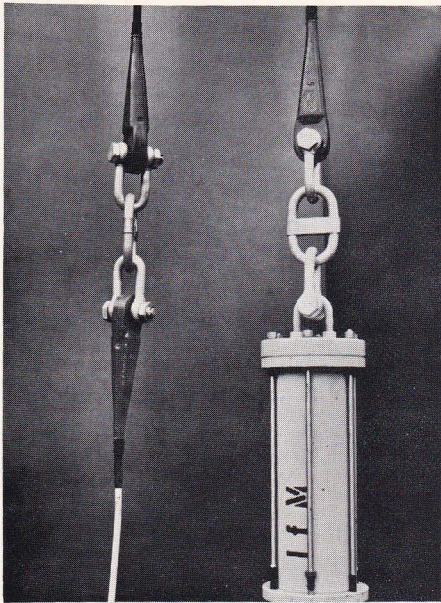
6



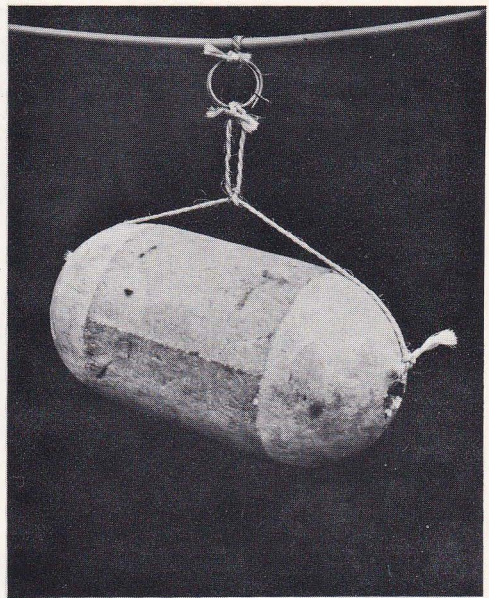
7

Tafel 3 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)

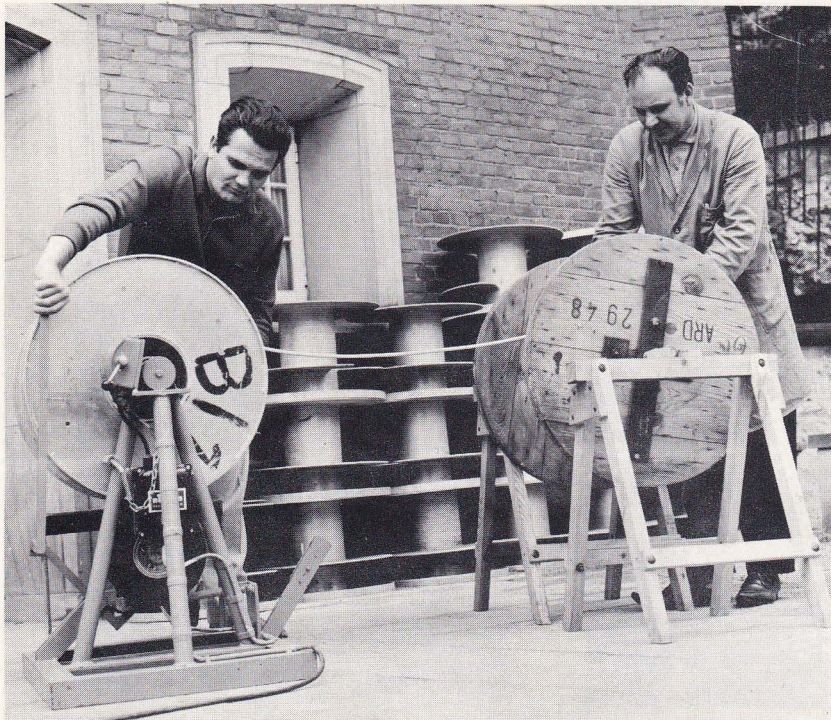




8



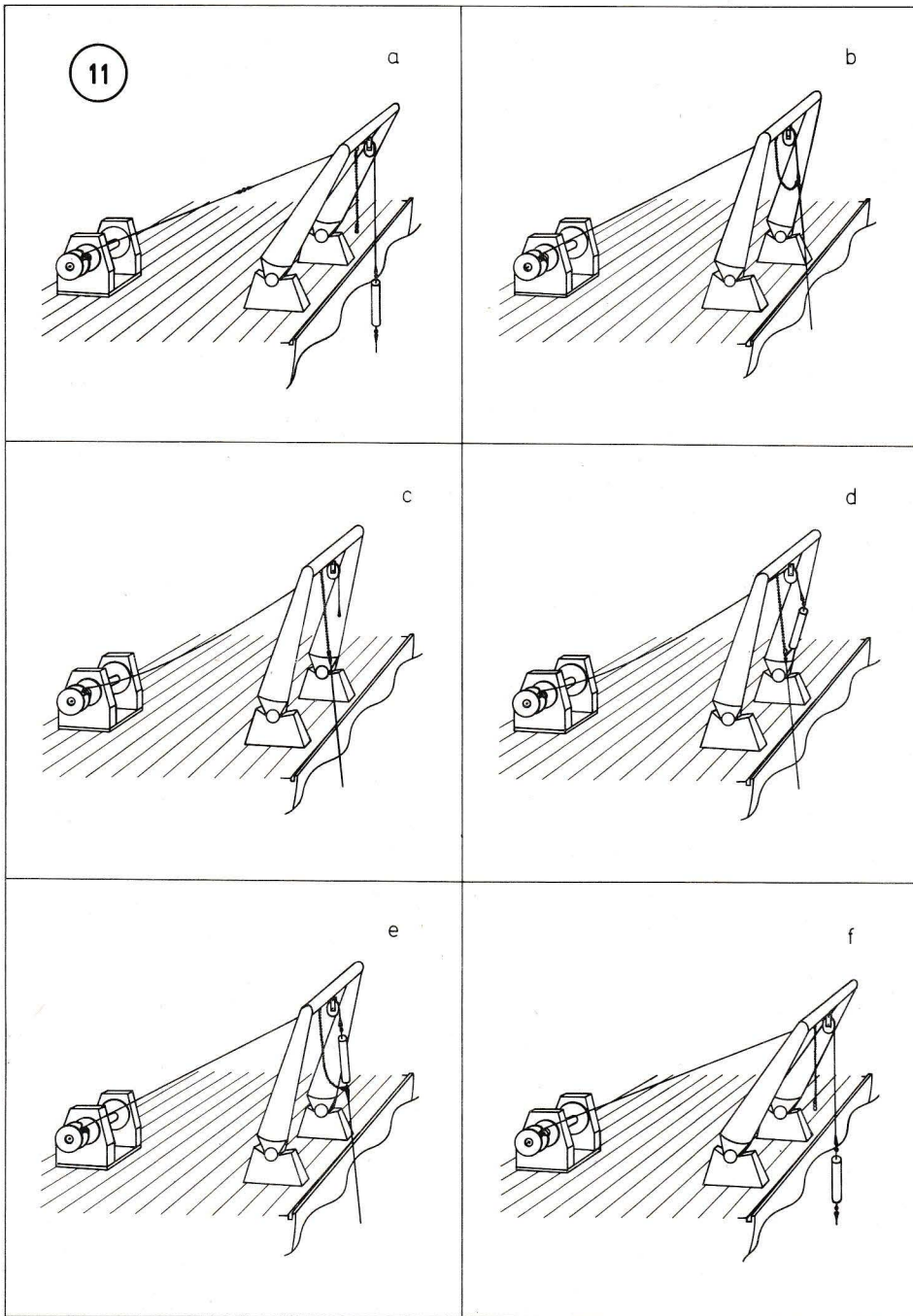
9



10

Tafel 4 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)

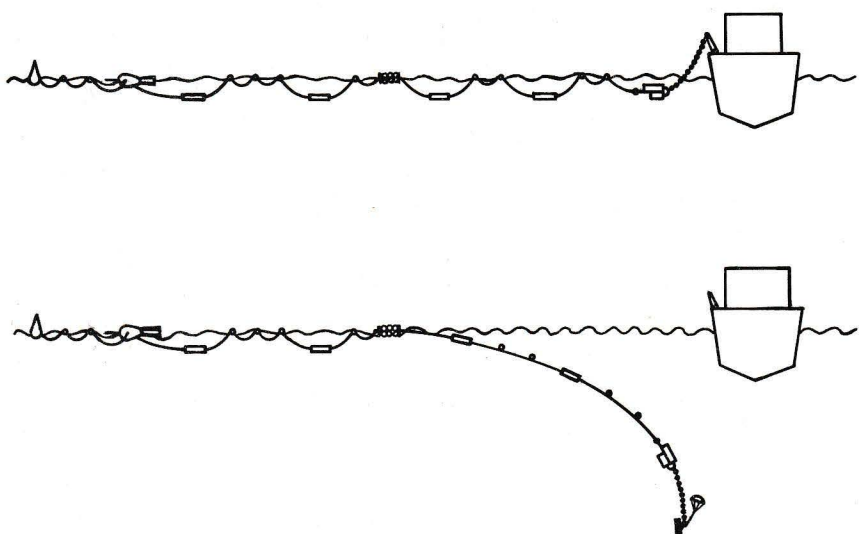




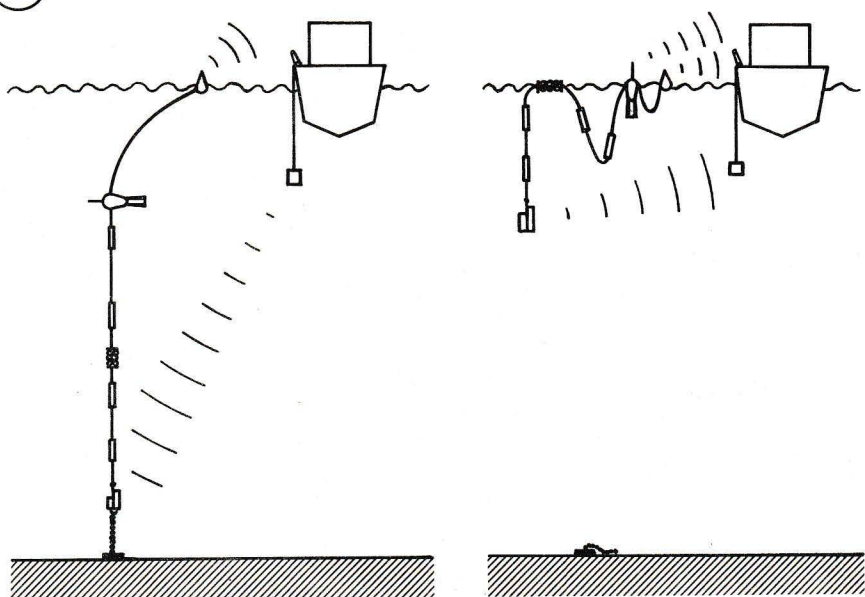
Tafel 5 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)



12



13



Tafel 6 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)

neben dem geringen Kostenaufwand den wichtigen Vorteil, daß einzelne Undichtigkeiten den Gesamtauftrieb nur um einen kleinen Bruchteil vermindern. Frühere Erfahrungen mit Aluminium- und Kunststoffkugeln ließen es als notwendig erscheinen, Stichproben aus den für den Einsatz vorgesehenen Kugeln einem langzeitigen Drucktest zu unterziehen. Dabei wurden wegen der Schlagunempfindlichkeit nur Kunststoffmaterialien vorgesehen. Vier Typen von Kugeln wurden ausgewählt und vom Geophysikalischen Institut in Bergen/Norwegen für 84 Tage in einem Fjord auf 860 m Tiefe verankert. Die Kugeln (nach Herstellerangaben typgeprüft für 100 kp/cm<sup>2</sup>) sind, wie schon frühere Erfahrungen zeigten, bei einem solchen Einsatz nicht vollständig wasserdicht. Es ergaben sich die Werte in Tab. 1. Der Typ INERGA-GS 5/20 war damit am besten für den Einsatz in Tiefseeverankerungen geeignet.

Abb. 2 zeigt den Aufbau der Auftriebs Elemente. Die Kugeln sind so angeordnet, daß bei Implosionen einzelner Kugeln das Risiko von Folgeimplosionen benachbarter Kugeln möglichst gering ist. Bei einem Einsatz von insgesamt 1340 Kugeln des genannten Typs über 6 Wochen trat keine einzige Beschädigung auf.

Tabelle 1  
Ergebnisse des Drucktests bei ausgewählten Kunststoffkugeln

Kugeltyp	Eingedrungenes Wasser [cm <sup>3</sup> ]	ca. Auftriebsverlust [%]
ALPIA GS 5/20 (grün)	220—265	8,5—10
ALPIA GS 5/20 (rot)	315—395	12 —15
INERGA GS 5/20 (orange)	0— 10	0 — 0,4

Für das oberflächennächste Auftriebs element wurde eine andere Konstruktion gewählt. Die Kugelanordnungen besitzen einen hohen Strömungswiderstand, der sich, wenn in Oberflächennähe starke Ströme auftreten, störend bemerkbar macht. Deshalb wurde in Oberflächennähe ein stromlinienförmiger Körper aus druckfestem Schaumstoff (Divinycell H 200, Raumgewicht 200 kp/m<sup>3</sup>) verwendet (Abb 3). Dieses Auftriebs- element erhält außerdem einen druckschaltergesteuerten Funkpeilsender und eine Aufhängevorrichtung, die während der Verankerungszeit eine horizontale Lage und beim Aufnehmen eine vertikale Lage des Schwimmkörpers gewährleistet.

### 2.3. Auslösegeräte und Sollbruchstellen

Eine weitere Möglichkeit für den Verlust des Verankerungssystems besteht bei einer mangelhaften Funktion des Auslösegeräts oder bei einer Auslösung während einer Schlechtwetterperiode. Um den Auslösezeitpunkt entsprechend der Wetterlage festlegen zu können, wurden akustische Auslösegeräte (Typ AMF Model 200) benutzt. Diese

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 2)

Abb. 4: Typisches Verankerungssystem.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 4)

Abb. 8: Seilverbindung und entsprechende Gerätebefestigung mit Ring zur Stopper-Befestigung und Korrosionsschutz-Elektrode.

Abb. 9: Styroporboje mit Korrosionsglied-Befestigung.

Abb. 10: Aufwickeln der Verankerungsseile auf die Spezialtrummeln.

Geräte lösen bei Empfang eines speziell kodierten Schallsignals, das vom Aufnahmeschiff gesendet wird, die Verbindung zum Anker und lassen das System aufschwimmen. Als zusätzliche Sicherung enthält das Auslösegerät eine Zeitsteuerung, die auf einen Zeitpunkt nach dem voraussichtlichen Aufnahmetermin eingestellt wird. Akustische und Zeit-Steuerung haben eine gemeinsame Endstufe und benutzen den gleichen Auslösemechanismus. Um auch bei Ausfall der Endstufe, etwa durch Undichtigkeit des Geräts, eine Aufnahme der Verankerung zu ermöglichen, ist zusätzlich ein völlig unabhängiges Auslösegerät mit Zeitsteuerung (Typ Geodyne Model 855) angebracht (Abb. 4). Soll eine zusätzliche Aufnahmemöglichkeit für den Fall geschaffen werden, daß die Auslösung trotz der mehrfachen Sicherung nicht möglich ist, so läßt sich eine Oberflächenfunkpeilboje (Typ Plath FB 860.1) einsetzen. Diese Boje (Abb. 5) befindet sich an der Oberfläche und ist über ein Kunststoffseil mit dem oberen Auftriebsselement verbunden. Bei einer Aufnahme ohne Auslösung muß allerdings der Anker gehoben werden. Um dabei einen Bruch im Verankerungssystem zu vermeiden, der zu einem Verlust von Geräten führt, ist zwischen den Auslösegeräten und dem Anker eine Sollbruchstelle (Abb. 6) eingeführt, deren maximale Bruchbelastung unter der des Seiles liegt. Diese Sollbruchstelle wird beim Auslegen durch ein Korrosionsglied überbrückt.

#### 2.4. Ortung des Verankerungssystems

Auf offener See bereitet es häufig Schwierigkeiten, die Position der Verankerung bis auf wenige hundert Meter Abweichung zu bestimmen. Es ist deshalb erforderlich, im Verankerungssystem selbst oder in einer benachbarten Zusatzverankerung Peilsender einzubauen. Die oben genannte Oberflächenboje (Abb. 5) mit Reichweiten von 5 bis 20 sm erfüllt diese Aufgabe. Als besonders wichtige Hilfe erwies sich der akustische Sender im Auslösegerät. Über ein vom Schiff gesendetes speziell kodiertes Schallsignal wird ein „Pinger“ im Auslösegerät eingeschaltet, der für ca. 1 Minute ein pulsmoduliertes Signal sendet. Der Empfang dieses Signals an Bord bestätigt, daß die Aufnahme-position erreicht und der Empfang der Steuersignale im Auslösegerät gewährleistet ist.

Bei einem Verlust der Oberflächenboje ermöglicht der Funkpeilsender im oberen Auftriebsselement eine Anpeilung des Verankerungssystems nach dem Aufschwimmen.

#### 2.5. Seilverbindungen und Korrosionsschutz

Typische Seilverbindungen zeigt Abb. 7. Als Schäkel wurden verzinkte C-Schäkel mit doppelter Sicherung durch Mutter und Splint verwendet. Eine Zusammenstellung der Schäkeldaten gibt Tab. 2.

Als zusätzlicher Korrosionsschutz wurden Zinkblech-Elektroden verwendet, die während des Auslegevorganges nach Herstellen der Seilverbindung über den zur Stopper-Befestigung dienenden Ring geklemmt werden. Diese einfache Maßnahme erwies sich bei mehrwöchigem Einsatz als sehr wirkungsvoll. Eine Beschreibung der Korrosionsschutzmaßnahmen bei den verwendeten Kauschen wird bei der Diskussion der Verankerungsseile in Abschnitt 4 gegeben.

#### 2.6. Typisches Verankerungssystem

Aus den diskutierten Überlegungen resultiert der Aufbau eines Verankerungssystems in der in Abb. 8 dargestellten Form. Von unten nach oben enthält sie folgende Teile:

---

Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 5)

Abb. 11: Einsetzen eines Meßgerätes beim Auslegen des Verankerungssystems.



Tabelle 2

C-Schäkel, Bolzen mit Mutter und Splint, DIN 82101  
Werkstoff: St 34.11 SM bzw. St 42.11 SM, blank oder feuerverzinkt

Nenngröße	Zul. Belastung [kp]	Innenmaße		Außenmaße		Gewinde	Gewicht [kp]
		Breite [mm]	Höhe [mm]	Breite ohne Bolzen [mm]	Durchm. [mm]		
0,1	100	9	27	17	5	M 5	0,013
0,16	160	10	31	20	6	M 6	0,021
0,25	250	12	38	24	8	M 8	0,042
0,4	400	15	47	31	10	M 10	0,082
0,6	630	20	61	40	12	M 12	0,17
1,0	1000	24	74	50	15	M 16	0,359
1,6	1600	29	94	63	19	M 20 × 2	0,745
2,0	2000	33	103	71	21	M 22 × 2	1,03
2,5	2500	37	115	79	23	M 24 × 2	1,43
3,0	3000	41	130	89	26	M 27 × 2	2,11
4,0	4000	45	143	99	29	M 30 × 2	2,9
5,0	5000	50	158	110	33	M 33 × 2	3,8
		[mm]	[mm]	—	[Zoll]	[Zoll]	[kp]
3/8	200	20	40	—	3/8	3/8	0,13
1/2	350	26	52	—	1/2	1/2	0,29
9/16	600	28	56	—	9/16	9/16	0,4
5/8	1100	32	64	—	5/8	5/8	0,74
3/4	1800	40	80	—	3/4	7/8	1,25
7/8	2300	44	88	—	7/8	1 —	1,75
1 —	2600	50	100	—	1 —	1 1/8	2,55
1 1/8	3500	56	112	—	1 1/8	1 1/4	3,6
1 1/4	4500	64	128	—	1 1/4	1 3/8	5,4
1 3/8	5000	70	140	—	1 3/8	1 1/2	7,5

Gewichtsanker (Stahl), Kette, Sollbruchstelle mit Überbrückung, Stahlseil, Auslösesystem mit akustischen und Zeit-Auslösern, Anordnung von Meßgeräten, Temperaturmeßkabel, Kugel-Auftriebs-elementen und Drehwirbeln, die durch kunststoffummantelte Stahlseile verbunden sind, stromlinienförmiges Auftriebs-element mit Funkpeilsender, Kunststoffseil mit Auftriebskugeln und Oberflächen-Funkpeilboje.

### 3. Auslege- und Aufnahmeverfahren

In Abschnitt 2 wurde dargestellt, warum ein Verankerungsverfahren gewählt wurde, bei dem man das Auslegen mit dem oberen Teil des Verankerungssystems beginnt und zum Schluß den Anker slippt. Im folgenden werden die Arbeitsgänge der Verankerungsvorbereitung, des Auslegens und des Aufnehmens dargestellt. Zur Vorbereitung des Auslegens werden die Seile, zusammengesetzt aus Standardlängen, entsprechend dem Verfahren an der Woods Hole Oceanographic Institution, an Land auf Spezial-Aluminiumtrommeln aufgespult (Abb. 9). Jede Trommel enthält eine Gesamtseillänge von

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 6)

Abb. 12: Schematische Darstellung des Auslegens eines Verankerungssystems.

Abb. 13: Schematische Darstellung des Aufnehmens eines Verankerungssystems.

einigen hundert Metern. Zum Auslegen der Verankerung werden die Seiltrommeln in der vorgesehenen Reihenfolge auf die Achse einer dafür vorbereiteten Winde des Schiffes gesetzt; das Seil wird dann gefiert.

Das Einsetzen der Geräte und der Auftriebs Elemente an den vorgesehenen Verbindungsstellen beim Auslegen erfolgt in der in Abb. 10 dargestellten Art. Eine Kette mit Stopperhaken befindet sich in der Nähe des Blockes am A-Rahmen, Baum oder Kran, über den die Seile laufen. Der Zug des bereits gefierten Seils wird kurzzeitig durch Einhaken des Stopperhakens in den Ring der Verbindungsstelle und weiteres Ausfieren des Seiles durch die Stopperkette übernommen. Nach Einsetzen des Meßgerätes übernimmt das Seil auf der Windentrommel nach kurzem Hieven wieder den Zug, der Stopper wird gelöst.

Durch entsprechendes Manövrieren des Schiffes wird dafür gesorgt, daß der ausgefierte Teil des Verankerungssystems unter mäßiger Zugspannung gehalten wird. Um die Bildung von Schleifen und spätere Kinkenbildung zu verhindern, werden Styroporbojen mit Korrosionsglied-Befestigungen (Abb. 11) in regelmäßigen Abständen am Seil angebracht, die sich nach wenigen Stunden vom Seil lösen sollen. Schließlich befindet sich die gesamte Verankerung mit Ausnahme des Ankers an der Meeresoberfläche (Abb. 12).

Es folgt der Arbeitsgang, bei dem die stärkste Beanspruchung des Verankerungssystems auftritt. Beim Slippen des Ankers erfolgt der Übergang von mäßiger zu hoher Zugspannung im Verankerungssystem. Voraussetzung für ein gefahrloses Absenken ist dabei die Vermeidung von Kinkenbildungen im Seil. Dafür sorgt man vor allem durch die Verwendung dreharmer Seile, ferner durch die beschriebene Anbringung von Styroporbojen und durch die Verringerung der Ankerfallgeschwindigkeit auf etwa 1,1 m/sec mit einem Fallschirm.

Die Aufnahme beginnt mit der Prüfung der akustischen Übertragungsstrecke vom Schiff zur Verankerung durch Abruf des zeitlich begrenzten Pinger-Signals, dann erfolgt die akustische Auslösung. Wenn das Auslösesignal vom Verankerungssystem ordnungsgemäß empfangen wurde, sendet das Auslösegerät als Bestätigung die Pinger-Signale ohne Zeitbegrenzung. Das Verankerungssystem schwimmt auf (Abb. 13). Dabei kann, wenn nur ein geringer Oberflächenstrom vorliegt, die Schwierigkeit auftreten, daß die Auftriebs Elemente an der Oberfläche sehr dicht beieinanderliegen und Schleifen in den Seilen auftreten. Die Gefährdung des Systems ist dabei jedoch relativ gering. Die Geräte, Auftriebs Elemente und Seile werden, beginnend mit der Oberflächenboje bzw. dem oberen Auftriebs Element, an Bord genommen. Die einzelnen Arbeitsgänge verlaufen analog zu denjenigen beim Auslegeverfahren.

#### 4. Prüfergebnisse zu Verankerungsseilen

##### 4.1. Erfahrung mit Verankerungsseilen

An Seile für Geräteverankerungen werden vor allem beim Auslegevorgang besondere Anforderungen gestellt. Einzelheiten dazu wurden im vorangegangenen Abschnitt diskutiert. Die bisher bei Auslegungen durch eine Reihe von Seilbrüchen gemachten Erfahrungen ließen es als notwendig erscheinen, die Frage der Verankerungsseile besonders intensiv zu bearbeiten. In den vorangegangenen Jahren waren von deutschen Instituten vorwiegend „Diepa-Seile“ für solche Verankerungen verwendet worden, die Verlustrate war relativ hoch. Ein Seilbruchstück von einer solchen Verankerung, das bei der Aufnahme brach, wurde vom Seilhersteller eingehend untersucht, um Ursachen, die zum Bruch führten, herauszufinden. Der Untersuchungsbericht lautete unter anderem:



„Das eingesendete Stahldrahtseil stellt ein „Diepa-Seil“ in der Konstruktion Diepa A 6 mm  $\varnothing$  dar. Etwa ein Meter und zwei Meter vom Kauschenende entfernt waren auf einer jeweils kurzen Seilstrecke mehrere Innenlitzen gebrochen und zwischen den Außenlitzen herausgetreten. Ferner zeigte das Seil im gleichen Bereich eine Verlängerung der Seilschlaglänge. Die Charakteristik eines solchen Defektes läßt einwandfrei darauf schließen, daß sich dieses nicht drehungsfreie Stahldrahtseil während seines Einsatzes bei Belastung aufdrehen konnte, d. h. es war in seiner Endbefestigung nicht fest geführt. Eine derartige Seilgefügeaufdrehung tritt bei Verwendung einer nicht-drehungsfreien Seilkonstruktion dann ein, wenn mit dem Seil ungeführte Lasten gehoben werden oder beispielsweise ein Wirbel am Seilende eingebaut wird. Nachdem bei einem Litzenspiralseil in Parallelschlagmachart, wie es das „Diepa A-Seil“ darstellt, die Außenlitzen aufgrund ihrer größeren Amplitude naturgemäß in einer größeren Länge im Seilgefüge liegen als die Innenlitzen, entsteht im Falle einer Seilgefügeaufdrehung eine Lockerung der Außenlitzen, die dazu führt, daß diese Litzen nicht mehr am Tragen teilnehmen und die Last somit nur noch von den Seilinnenlitzen aufgenommen wird. Dabei entsteht eine reine Überlastung des Seilinnenquerschnittes, die den Bruch der Innenlitzen zur Folge hat. Die gegebenen Einschnürungen an den Drahtbruchenden lassen ebenfalls deutlich auf eine reine Überlastung schließen.

Für einen Defekt, wie er bei dem Seilstück gegeben ist, ist keinesfalls ein Material- oder Verseilfehler verantwortlich zu machen. Nur durch Verwendung einer drehungsfreien Konstruktion kann bei obenerwähnten Einsätzen die vorgefundene Beschädigung ausgeschaltet werden. Bekanntlich ist bei einem drehungsfreien Seil der Kern (Innenlitzen) entgegen den Außenlitzen verseilt. Unter Belastung entstehen für Seilkern und Außenlitzen etwa gleich große Drehmomente, die entgegengerichtet sind und sich daher entsprechend kompensieren.“

Zu diesem Prüfbericht sei bemerkt, daß es sich bei dem Seilbruchstück um ein Teil einer Verankerung von den Atlantischen Kuppenfahrten 1967 handelte. Die Einsatzdauer betrug etwa 6 Wochen. Dem Prüfer ist nicht bekannt gewesen, unter welchen Umständen das Seil verwendet worden war. Tatsächlich sind die einzelnen Seilenden des Verankerungssystems mit Drehwirbeln miteinander verbunden gewesen, so daß sie sich frei drehen konnten.

#### 4.2. Allgemeine Anforderungen an neue Seilkonstruktion

Aufgrund der bisher gemachten Erfahrungen und der Seiluntersuchungen lassen sich die technischen Anforderungen an ein neues Verankerungsseil stellen:

- a) kleiner Seildurchmesser
- b) hohe Festigkeit
- c) Korrosionsbeständigkeit
- d) Drehfreiheit unter Belastung
- e) geringes Gewicht.

Um diese Forderungen in einer Konstruktion zu vereinen, werden an die Verseilerei höchste Anforderungen gestellt. Die Drehfreiheit unter Belastung muß bis zur halben Bruchlast erreicht werden, da Zugbeanspruchungen bei Verankerungsauslegungen und -aufnahmen in dieser Größenordnung im ungünstigen Falle kurzzeitig auftreten können. Dabei darf die Seilkonstruktion jedoch wegen Überlastung nicht zerstört werden. Es soll hier darauf hingewiesen werden, daß im Kran- und Aufzugbau die eingesetzten Seile mit einer 8- bis 10-fachen Sicherheit vorgesehen werden.

Um Drehfreiheit zu erzielen, muß gefordert werden, daß die Summe der entstehenden Drehmomente unter Belastung im Seil gleich Null ist. Das läßt sich, zumindest näherungs-



weise, grundsätzlich mit zwei verschiedenen Seilkonstruktionen erreichen, nämlich mit geschlagenen oder mit geflochtenen Seilen. Als Materialien kommen Metalle oder Kunststoffe in Frage. Hier sollen nur Stahlseile diskutiert werden.

Der Aufbau bei einer geschlagenen drehungsfreien Seilkonstruktion muß zwangsläufig aus mehreren Seillagen bestehen. Zur Erzielung gleichmäßiger Seildehnung und eines gleichmäßigen Seiltragens des gesamten metallischen Seilquerschnittes ist erforderlich, daß die inneren Seilanteile mit kleinerer Amplitude verseilt werden müssen als die äußeren Seilanteile. Dadurch ergibt sich für die inneren Seilanteile ein höherer Verformungsgrad als für die äußeren Seilanteile. Der Verformungsgrad der verschiedenen Seillagen wirkt sich sehr unterschiedlich auf die Konstruktion aus, da die elastischen Eigenschaften des Drahtmaterials schon bei der Herstellung der Einzeldrähte gewissen Toleranzen unterliegen, die sich von Charge zu Charge geringfügig ändern. Die bei einer geschlagenen Seilkonstruktion zur Erzielung absoluter Drehungsfreiheit notwendigen gleich großen, entgegengesetzt gerichteten Drehmomente der Seilaußenlage und des Seilkernes sind also nicht nur von der Größe des metallischen Querschnittes der Seilaußenlage und des Seilkernes abhängig. Die Größe der entsprechenden Drehmomente steht auch in Beziehung zur Größe der spezifischen Belastung des jeweiligen Seilanteils, wobei natürlich angestrebt wird, eine gleich große spezifische Belastung des gesamten Seilquerschnittes zu erreichen.

Bei einem geflochtenen Seil kann durch den symmetrischen Aufbau gewährleistet werden, daß diese Konstruktion absolut drehfrei ist. Einflüsse von Material- und Elastizitätsunterschieden der Einzeldrähte in den verflochtenen Einzelsträngen werden durch den Seilaufbau ausgeschlossen. Der spezifische metallische Seilquerschnitt ist jedoch erheblich kleiner, so daß die Bruchlast eines geschlagenen Seiles mit gleichem Außendurchmesser größer ist. Die Beanspruchung der verflochtenen Einzelstränge ist im Gegensatz zu einem geschlagenen Seil keine reine Zugbeanspruchung, sondern bei jedem Flechtschlag gleichzeitig eine Zug- und Scherbeanspruchung. Eine Verdrehung des Flechtseiles durch äußere Kräfte beeinträchtigt die Bruchlast nicht, sofern die Drehung klein bleibt.

#### 4.3. Zusammenfassung der technischen Daten für eine Seilkonstruktion

Für die Verankerungen 1969 des Instituts für Meereskunde Kiel wurden aufgrund der genannten Überlegungen folgende Alternativlösungen vorgeschlagen:

- a) Stahlseil aus starkverzinktem Draht mit einem Mantel aus Kunststoff, der hohe mechanische Festigkeit besitzt.

Durchmesser des Stahlseiles: ca. 8 mm

Durchmesser des Seiles mit Kunststoffmantel: ca. 10 mm

Bruchlast: 4500 bis 5500 kp

Kurzzeitige Belastung des Seiles: halbe Bruchlast

Dreharme Seilkonstruktion, d. h. bei Belastung bis zur halben Bruchlast darf bei einer Einzellänge von 10 m ein Drehwinkel von  $20^\circ$  nicht überschritten werden.

Die Verpressung der Kauschen muß so erfolgen, daß die Preßstellen bis zu einem Wasserdruck von  $500 \text{ kp/cm}^2$  wasserdicht sind.

Gewicht: 0,3 bis 0,5 kp/m

Einsatzdauer des Seiles: 4—5 Monate.

- b) Nirosta Stahlseil ohne Kunststoffmantel.

Mechanische Anforderungen an das Seil wie unter a).

Die geringeren Herstellungskosten führten zu einer Entscheidung für den erstgenannten Seiltyp.

#### 4.4. Anforderungen an den Seilmantel

Im Seeeinsatz unterliegt der Seilmantel höchsten mechanischen Beanspruchungen. Mögliche Beschädigungen durch Scheuern an Umlenkrollen und Bordwand vermindern die Standzeit des Seiles dadurch, daß Korrosionsgefahr durch Wassereintrich besteht. Ein Aufreißen des Mantels bei etwaiger Kinkenbildung darf nicht auftreten, d. h. das Mantelmaterial muß so flexibel sein, daß bei Biegung des Seiles um seinen eigenen Durchmesser keine Beschädigung des Mantels eintritt. Diesen Anforderungen muß das Mantelmaterial in einem Temperaturbereich von  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  standhalten, wobei die Elastizität des Materials bei niedrigen Temperaturen erhalten bleiben muß. Das Aufbringen des Mantels auf das Stahlseil kann nur unter hohem Druck und bei hoher Temperatur erfolgen, um die Luftfeuchtigkeit des im Seil verbleibenden Luftanteils sehr klein zu halten und damit Korrosionsschäden durch Kondenswasserbildung auszuschließen.

#### 4.5. Anforderungen an die Kauschenverbindung

Ein besonderes Problem stellt die Wasserdichtigkeit der Seilbefestigungen (Kauschen) dar. Das ummantelte Verankerungsseil muß an den Enden vor Wassereintrich geschützt werden, wobei die Festigkeit des Seiles nicht vermindert werden darf. Die Kauschenverbindung soll trotz absoluter Wasserdichtigkeit so ausgebildet sein, daß Schwingungen, die bei einem verankerten Seil auftreten, nicht an dem Übergang vom Seil zur Kauschenverpressung aufgefangen, sondern durch die ganze Kausch hindurch auf den Schäkelbolzen übertragen werden. Langzeitige Testversuche haben ergeben, daß bei unsachgemäßem Übergang vom Seil zur Kausch die Biegezugfestigkeit stark vermindert wird, so daß Seilbrüche unvermeidbar werden. Außerdem ergibt sich für die Konstruktion der Kausch die Forderung, Beschädigungen durch Zugbelastungen an Umlenkrollen auszuschließen.

Von Endbestigungen in Form von Gabelseilhülsen sollte abgesehen werden, da dort als Vergußmaterial Blei- oder Zinnlegierungen verwendet werden, die bei Verbindung mit Seewasser zu starker Korrosion neigen. Bei langfristigem Seeeinsatz ist die Sicherheit solcher Seilverbindungen nicht mehr gewährleistet.

#### 4.6. Zusammenstellung von serienmäßig hergestellten Seilen

Die genannten Forderungen wurden 16 (15 deutschen und einem ausländischen) Herstellern für Drahtseile in einer Anfrage vorgelegt, und es wurde um Seilmuster für Testversuche gebeten. 7 Hersteller reagierten nicht auf die Anfrage. Die von den übrigen Firmen angebotenen Seilkonstruktionen sind in Tab. 3 aufgeführt.

Die Tabelle zeigt, daß im allgemeinen bei geschlagenen Seilen der Seilaufbau  $3 \times 19$  und  $7 \times 19$  und bei geflochtenen Seilen  $6 \times 19$  vorgeschlagen wird. Die größten Schwierigkeiten liegen in der Herstellung von druckwasserdichten Kauschenverbindungen. Nach eingehender Prüfung der Seilmuster und der Preise erschienen drei Firmen in der Lage, die geforderten Testseilproben herzustellen. Zu den vom Institut für Meereskunde durchgeführten Seiltests lagen Seilproben der Firma Nr. 1 und der Firma Nr. 3 vor. Die Ergebnisse sind im folgenden wiedergegeben.

#### 4.7. Test des Drehverhaltens

Bei diesem Testversuch wurde ein jeweils 10 m langes Seilstück von einem Kranseil frei hängend mit verschiedenen Gewichten belastet und anschließend bei etwa halber Bruchlast plötzlich entlastet. Die Angaben in Tab. 4 zu Drehungen sind auf das Kranseilende bezogen.



Tabelle 3  
Vorgeschlagene Seilkonstruktionen mit Herstellerangaben

Firma Nr.	Seildurch- messer [mm]	Machart	Kon- struktion	Bruch- last [kp]	Material	Mantel	Wasser- dichte Kausch
1	8,5	geflochten	6 × 19	3660	Stahl/verz.	Polyamid	—
	8,5	geflochten	6 × 19	3600	V 2 A/V 4 A	Polyamid	entfällt
2	8,0	geschlagen	7 × 19	5200	Stahl/verz.	Polyurethan	—
	9,0	geschlagen	7 × 19	5700	EW 4541	—	entfällt
3*)	8,0	geschlagen		4310	Stahl/verz.	Desmopan	ja
4	8,0	geschlagen	3 × 19	5700	Stahl/verz.	—	—
2	8,0	geschlagen	3 × 19	5500	Stahl/verz.	Nylon (?)	—
	8,0	geschlagen	3 × 7	—	Stahl/verz.	Nylon (?)	—
6	8,0	geschlagen	7 × 19	4640	Stahl/verz.	—	—
7	10,0	geschlagen	7 × 19	6510	Stahl/verz.	Polyäthylen	—
8	8,0	geschlagen	—	3850	Stahl/verz.	Polyurethan	—
9	10,0	geschlagen	3 × 24/ 12 × 6	7335	Stahl/verz.	—	—

\*) Firma hat 13 verschiedene Konstruktionen für Testversuche erstellt.

#### 4.8. Zerreiversuch

In einem Werkstoffuntersuchungslabor wurden die Seilproben einen Zerreiversuch unterzogen. Die Zerreidiagramme (Abb. 14) zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung.

Seilbruch — Probe Nr. 1: 1.740 kp

Seilbruch — Probe Nr. 3: 3.965 kp

Zu dem Zerreiversuch soll bemerkt werden, daß die rechnerische Bruchlast der Seilprobe Nr. 1 mit 3.660 kp angegeben war. Der Verlauf der Kurve zeigt, daß die spezifische Belastung der einzelnen Seilanteile gleichmäßig ist. Bei Seilprobe Nr. 3 tritt zwischen 1.560 kp und 2.080 kp eine übermäßige Dehnung der Zerreißprobe auf, die auf die Verformung der Kausch zurückzuführen ist, die bei dem Zerreiversuch auch direkt sichtbar wird. Der verwendete Kunststoffring in der Kausch hielt der Zugbeanspruchung nicht stand. In der endgültigen Kauschenausfhrung ist ein V 2 A-Ring verwendet worden (Abb. 15). Fügt man die beiden Teilstücke der Belastungskurve aneinander, so zeigt auch dieser Kurvenverlauf, daß die spezifische Belastung der einzelnen Seilanteile bis 3.700 kp gleichmäßig ist.

#### 4.9. Manteltest

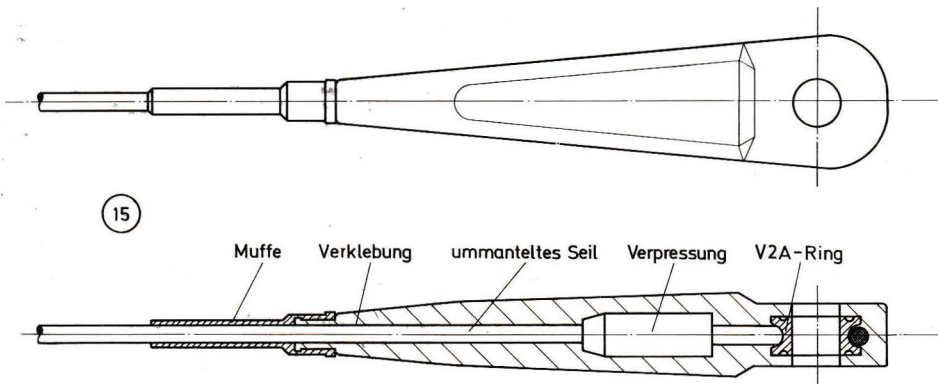
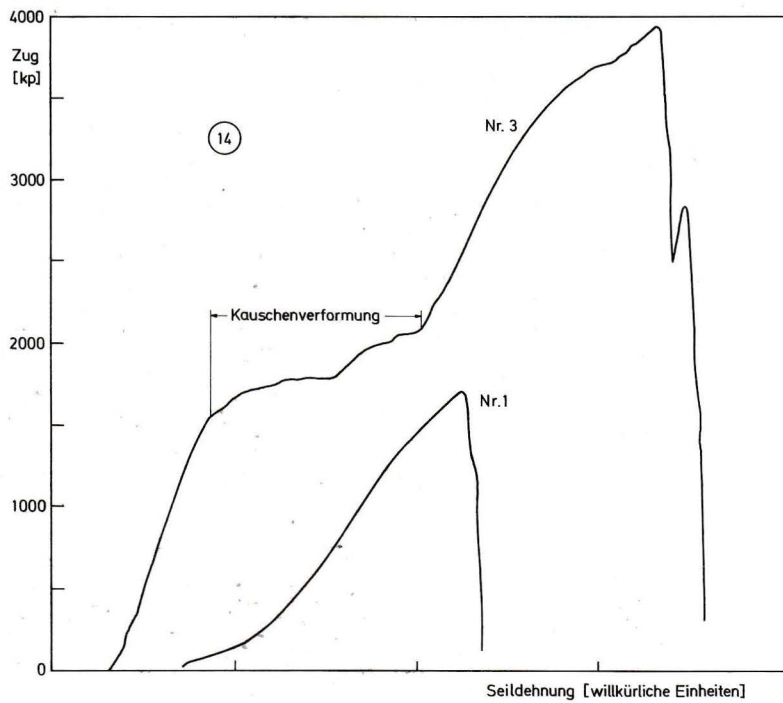
Bei diesen nur qualitativen Prüfungen wurde die Flexibilität der Kunststoffe des Seilmantels bei Temperaturen von + 20° C und — 3° C und die Abriebfestigkeit durch Ziehen über eine scharfe Metallkante getestet. Außerdem wurden die Seilproben um

#### Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 7)

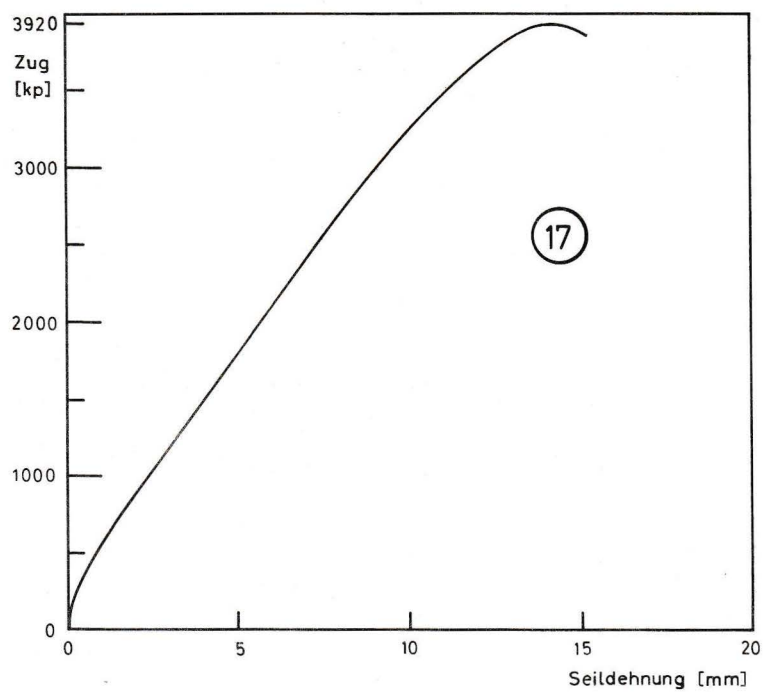
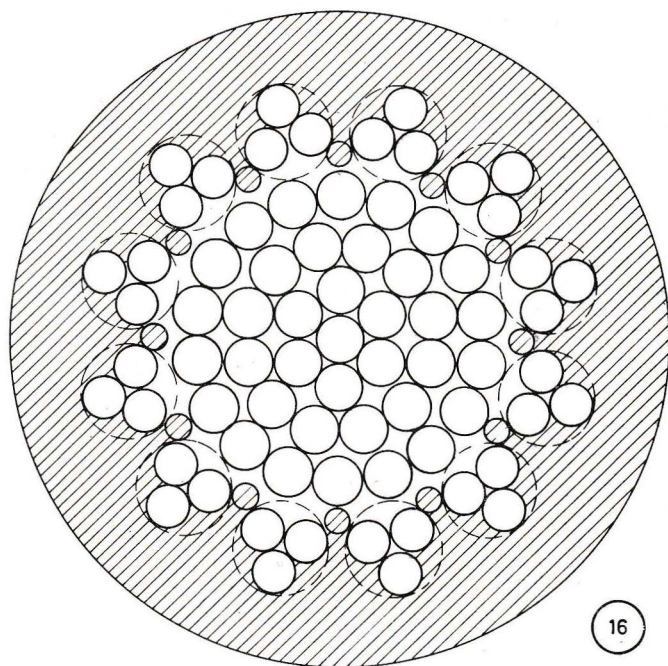
Abb. 14: Zerreißdiagramm für die Seilproben Nr. 1 und 3. Willkürliche Einheiten bei der Längenänderung  $\Delta l$ .

Abb. 15: Endgültige Ausführung der flexiblen, wasserdichten Seilkausche.





**Tafel 7** (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)



Tafel 8 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)

Tabelle 4  
Testergebnisse zum Drehverhalten der Seilproben Nr. 1 und 3

Seilprobe Nr.	Belastung [kp]	Verhalten
1	ca. 700	gut, keine Drehung Seil dehnt sich um ca. 15 cm
	ca. 1050	gut, keine Drehung
	ca. 1600	gut, keine Drehung
	Flechtseil, 8 mm Ø, mit eingepreßten Kauschen, Seillänge nicht vorgereckt. Die Drehung des Kranseiles (Auspendeln) wurde vollständig von der Testseillänge aufgenommen. Das Seil neigt nach Belastung nicht zur Kinkenbildung.	
	Belastung [kp]	Verhalten
3	ca. 700	gut, keine Drehung
	ca. 1050	Seil dreht sich langsam um 360°, dann Drehung zurück auf 120°; Gesamtdrehung 120°
	ca. 1600	Drehung im Seil um 990°, dann Drehung zurück bis 90°; Gesamtdrehung 90°
	Zeit des Auf- und Zudrehens: ca. 4 min Geschlagene Seilkonstruktion, 8 mm Ø, mit eingepreßten Kauschen, Seillänge nicht vorgereckt. Das Seil neigt nach Belastung nicht zur Kinkenbildung.	

den Eigendurchmesser unter Last geknickt (Kinken). Das Ergebnis ist in der folgenden Tab. 5 dargestellt.

Tabelle 5  
Prüfenergebnisse mechanischer Testversuche an den Seilproben Nr. 1 und 3

Seilprobe Nr.	Flexibilität		Abtriebs- festigkeit	Verhalten des Mantels bei Knickung
	bei — 3° C	bei + 20° C		
1	sehr steif	gut biegsam	sehr gut	gut
3	gut biegsam	gut biegsam	sehr gut	gut

#### 4.10. Kauschentest

Der Isolationswiderstand zwischen Stahlseil und Wasser wurde in einem Drucktank gemessen, um die Druckfestigkeit der Kauschen zu prüfen. Der Test konnte nur mit 2 Kauschen zu Seilprobe Nr. 3 durchgeführt werden, da für Nr. 1 keine druckfeste Kausch vorhanden war. Vor den einzelnen Messungen, die mit verschiedenen Prüfspannungen durchgeführt wurden, sind die Prüflinge jeweils 10 Minuten dem Testdruck ausgesetzt worden. Das Ergebnis zeigt Tab. 6. Die Widerstandszahlen zeigen, daß beide Kauschen als druckwasserdicht anzusehen waren. Der Grund für die beträchtlichen Änderungen bei Kausch 1 für niedrige Drucke konnte nicht festgestellt werden.

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 8)

Abb. 16: Aufbau der Diepa-Seilprobe IX. Linksgängig:  $1 \times 0,7$  mm,  $6 \times 0,6$  mm,  $12 \times 0,57/8$  mm,  $18 \times 0,57/8$  mm. Rechtsgängig:  $12 \times 3 \times 0,62/3$  mm. Gestrichelt: Desmopan.

Abb. 17: Zerreißdiagramm für das ausgewählte Diepa-Seil Nr. IX.



Die technische Ausführung der Kauschen, die in Zusammenarbeit des Herstellers mit dem Institut für Meereskunde Kiel entwickelt wurde, ist in Abb. 15 dargestellt. Nach Angaben der Herstellerfirma traten bei Dauerversuchen mit periodisch wechselnder Be-

Tabelle 6  
Prüfergebnisse des Kauschendruckversuchs

Druck (kp/cm)	Mindestzeit der Druck- belastung [min]	Prüf- spannung [V]	Widerstand Kausch 1 [M $\Omega$ ]	Widerstand Kausch 2 [M $\Omega$ ]
0	—	1000	128	27
		500	140	30
50	10	1000	144	28
		500	150	31
100	10	1000	60	32
		500	76	34
150	10	1000	7	35
		500	9	38
200	10	1000	16	40
		500	13,5	41
250	10	1000	9	46
		500	25	48
300	10	1000	10	52
		500	27	55
350	10	1000	20	60
		500	33	61
400	10	1000	20	66
		500	28	72
450	10	1000	26	76
		500	38	81
500	10	1000	27	84
		500	37	90
0	10	1000	16	16
		500	19	20

lastung bei einer Kauschenhülle aus einem festen Material (PVC) Seilbrüche an der Eintrittsstelle vom Seil in die Kausch nach  $0,33 \times 10^6$  Lastspielen auf, während bei einer flexiblen Kauschenumhüllung (Desmopan) der Dauerversuch ohne Beobachtung von Seilbrüchen nach  $22 \times 10^6$  Lastspielen abgebrochen wurde. Der Durchmesser der Testseile betrug jeweils 8 mm.

Diese Angaben zeigen, daß bei der Kausch mit Desmopanumhüllung die Schwingungen des Seiles durch die Kausch hindurch auf den Schäkelbolzen übertragen wurden, während das bei der festen Kauschenhülle nicht der Fall war.

#### 4.11. Aufbau und Tests speziell angefertigter Seile

Da die dem Test unterzogenen Seilproben in Bezug auf die Drehfreiheit noch nicht den gestellten Anforderungen genügten, wurden weitere Seilproben verschiedener Konstruktion speziell für die vorgesehenen Anwendungen geschlagen und auf dem Prüfturm getestet. Die Testseillänge betrug jeweils 9,4 m. Tab. 7 gibt eine Zusammenstellung der technischen Daten für diese Seilproben.

Wie aus den Seildaten zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Seilkonstruktionen Nr. I bis IX nur wenig. Die Seilschlaglängen waren allerdings unterschiedlich gewählt

worden. Über die Schlaglängenverhältnisse der einzelnen verseilten Seilanteile wurden von der Herstellerfirma keinerlei Angaben gemacht.

Tab. 8 gibt an, wie stark und in welcher Reihenfolge die Seile bei bestimmter Belastung relativ zur äußeren Schlagrichtung drehen.

Tabelle 7  
Technische Daten der Seilproben Nr. I bis IX

Probe Nr. . . . . .	I	II	III	IV	V
Seildurchmesser [mm] .	7	7	8	8	8
Aufbau . . . . .	1 × 0,93 6 × 0,82/3 12 × 0,80 18 × 0,78/9 24 × 0,75	1 × 1,15/7 6 × 1,02/2 12 × 1,00 18 × 0,95	1 × 0,75 6 × 0,57/8 12 × 0,57/8 18 × 0,57/8 24 × 0,57/8	wie Nr. III, unterschieden durch Schlaglänge	1 × 0,68/70 6 × 0,60 12 × 0,59 18 × 0,57/58 24 × 0,57/58
Stützdrähte . . . . .	—	—	12 × 0,41		12 × 0,41
Litzen . . . . .	—	—	12 1 × 0,37 5 × 0,49		12 1 × 0,37 5 × 0,49
rechnerische Bruchlast [kp] bei 160 kp/mm <sup>2</sup> .	4.650	4.500	4.540	4.540	4.540
Realbruchlast [kp] . .	4.200	3.850	4.220	4.380	4.440
Probe Nr. . . . . .	VI	VII	VIII	IX	
Seildurchmesser [mm] .	8	8	8	8	
Aufbau . . . . .	wie Nr. V, unterschieden durch Schlaglänge	wie Nr. V, unterschieden durch Schlaglänge	1 × 0,75 6 × 0,57/8 12 × 0,57/8 18 × 0,57/8 24 × 0,57/8	1 × 0,70 6 × 0,60 12 × 0,57/8 18 × 0,57/8	
Stützdrähte . . . . .			12 × 0,41	12 × 0,41	
Litzen . . . . .			12 1 × 0,37 5 × 0,49	12 3 × 0,62/3	
rechnerische Bruchlast [kp] bei 160 kp/mm <sup>2</sup> .	4.540	4.540	4.540	4.310	
Realbruchlast [kp] . .	4.380	4.450	4.220	3.920	

Aus den Proben I bis IX ist die Seilkonstruktion IX für die Tiefseeverankerung ausgewählt und bei der Expedition Norwegische See 1969 verwendet worden. In Abb. 16 ist der mechanische Aufbau und in Abb. 17 das Zerreißdiagramm für diese Seilprobe dargestellt.

Wie aus Abb. 17 hervorgeht, trägt der gesamte metallische Querschnitt die Last sehr gleichmäßig. Es kommt zu keiner einseitigen Belastung und frühzeitigen Zerstörung einzelner Seilquerschnittanteile.

Die Seilproben XIII und IX waren mit einem Desmopanmantel umhüllt. Dieser Seilmantel dient nicht nur dem Schutz gegen Korrosion, er beeinflusst auch die mechanischen Eigenschaften und bewirkt u. a. eine erhebliche Schwingungsdämpfung, die bei dem vorgesehenen Seileinsatz von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist. Nach Herstellerangaben hat die Erfahrung bei der Verankerung von Seeminen gezeigt, daß außer der Seewasserkorrosion die Schwingungsbeanspruchung als Hauptverschleißkomponente gewertet werden muß.

Aus Abb. 16 ist erkennbar, daß die äußeren Litzen von den schwalbenschwanzförmigen Kunststoffanteilen des Mantels umfaßt werden. Die Bewegungsfreiheit der Außenlitzen



ist bei Seilbiegung, -drehung und -belastung gewährleistet, dagegen ist die Radialbewegung durch den Mantel verringert. Der Mantel sorgt so dafür, daß das Gefüge des Stahlseils unter den genannten Beanspruchungen nicht verändert wird.

In Tab. 9 werden die technischen Daten der beschriebenen Seilkonstruktionen für verschiedene Seildurchmesser angegeben.

Tabelle 8  
Prüfergebnisse zum Drehen der 9,4 m langen Seilproben  
Nr. I bis IX bei Belastung

Probe Nr.	Drehrichtung	Drehung [grad] bei einer Belastung in [kp] von			
		500	1000	1500	2000
I	auf	45	45	22,5	67,5
	zu	45	22,5	22,5	67,5
	gesamt	0	22,5	0	0
II	auf	225	270	225	742,5
	zu	180	225	202,5	742,5
	gesamt	45	45	22,5	0
III	auf	180	180	517,5	697,5
	zu	135	180	405	585
	gesamt	45	0	112,5	112,5
IV	auf	315	337,5	540	945
	zu	270	292,5	450	787,5
	gesamt	45	45	90	157,5
V	auf	720	877,5	607,5	360
	zu	1080	1147,5	742,5	472,5
	gesamt	360	270	135	112,5
VI	auf	22,5	225	360	697,5
	zu	22,5	180	292,5	585
	gesamt	0	45	67,5	112,5
VII	auf	90	315	562,5	697,5
	zu	90	270	495	585
	gesamt	0	45	67,5	112,5
VIII	auf	180	337,5	562,5	857,5
	zu	157,5	270	472,5	720
	gesamt	22,5	67,5	90	137,5
IX	auf	—	0	—	0
	zu	—	22,5	—	0
	gesamt	—	22,5	—	0

Tabelle 9

Technische Daten der DIEPA-Sondermachart (nach Seilprobe Nr. IX)  
in drehungsfreier Ausführung aus verzinkt nachgezogenen Drähten und  
mit Kunststoffmantel aus Desmopan

Gesamtseil- nennndurchmesser	Manteldicke	Seilbasis- Konstruktions- durchmesser	Metallischer Querschnitt	ca. Gewicht per 100 m	Rechnerische Bruchbelastung bei 160 kp/mm <sup>2</sup>
[mm]	[mm]	[mm]	[mm <sup>2</sup> ]	[kp]	[kp]
5,5	0,75	4,0	7,1	8,5	1.140
8,0	1,00	6,0	16,1	18,0	2.580
10,0	1,00	8,0	26,9	29,0	4.310
12,0	1,00	10,0	44,9	46,5	7.170
14,5	1,25	12,0	65,5	67,5	10.470
16,5	1,25	14,0	88,5	89,0	14.150

Bei der Etablierung der Kauschen an die einzelnen Verankerungsseillängen ist die Einfärbung der Kauschen möglich, um die Seillängen besser und leichter unterscheiden zu können. Vom Institut für Meereskunde ist eine Farbkennzeichnung in Anlehnung an den internationalen Farbcod für elektrische Bauteile gewählt worden, der in Tab. 10 angegeben ist. Zusätzlich wurde zur Kennzeichnung einer Drahtlänge in jeder Kausch die Meterzahl (Schriftgröße 10—12 mm) eingebrannt.

Tabelle 10  
Farbcod der Kauschen zur Kennzeichnung der Seillängen

Länge [m]	Farbe
1, 10, 100, 1000 . . . . .	braun
2, 20, 200, 2000 . . . . .	rot
3, 30, 300, 3000 . . . . .	orange
4, 40, 400, 4000 . . . . .	gelb
5, 50, 500 . . . . .	grün
6, 60, 600 . . . . .	blau
7, 70, 700 . . . . .	lila
8, 80, 800 . . . . .	grau
9, 90, 900 . . . . .	weiß
Zwischenlängen wie 15, 25, 75 usw.	hellgrün

## 5. Bestimmung des Kräftegleichgewichts bei Verankerungssystemen

Beim Entwurf eines Verankerungssystems ist die Frage nach dem notwendigen effektiven Auftrieb, also nach der Zahl und Verteilung der Auftriebselemente zu beantworten. Im allgemeinen wird es genügen, dazu das statische Verhalten des Systems zu berechnen. Im folgenden wird die Kräfteverteilung und die resultierende Geometrie eines Verankerungssystems diskutiert.

### 5.1. Kräfteverteilung am angeströmten System

Ein Verankerungssystem der in Abschnitt 2 beschriebenen Art kann als umgekehrtes mathematisches Pendel angesehen werden, wenn alle auf das System einwirkenden äußeren Kräfte auf einen Punkt, den Endpunkt der Verankerungsseillänge, reduziert werden und das Verankerungsseil in erster Näherung als starr angenommen wird.

Damit ergeben sich die in Abb. 18 angegebenen Kräfteverteilungen, wobei die Beträge der Vektoren gegeben sind durch:

K = Effektiver Auftrieb, d. h. Gesamtauftrieb vermindert durch das Eigengewicht des Systems im Wasser

S = Seilzug

P = Horizontale Schubkraft der Strömung bzw. Strömungswiderstand, reduziert auf Punkt A

R = Rückstellkraft des Systems.

Aus der Geometrie dieser Kraftvektoren ergeben sich die Beziehungen:

$$R = P \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

$$R = K \cdot \sin \alpha \quad (2)$$



Läßt sich  $P$  aus dem Stromprofil berechnen, so ergibt sich  $K$  für einen vorgegebenen Auslenkungswinkel aus den Gleichungen (1) und (2) zu

$$K = \frac{P}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (3)$$

$P$  erhält man mit dem Widerstandsbeiwert  $c$ , der angeströmten Querschnittsfläche  $F$ , der Wasserdichte  $\rho$  und der Stromgeschwindigkeit  $V$  aus

$$P = c F \frac{\rho}{2} V^2 \quad (4)$$

Der Widerstandsbeiwert  $c$  ist abhängig von der Reynoldszahl.

## 2.2. Reynoldszahl und Widerstandsbeiwert

Die Reynoldszahl ist definiert durch:

$$\operatorname{Re} = \frac{V_c L_c}{\nu}$$

$V_c$  = charakteristische Geschwindigkeit

$L_c$  = charakteristische Länge

$\nu$  = Zähigkeit.

Bei den Teilen der hier diskutierten Verankerungssysteme handelt es sich vorwiegend um zylindrische Körper.

Setzt man für  $V_c$  den Betrag der Stromgeschwindigkeit aus dem Vertikalprofil und für  $L_c$  den Zylinderdurchmesser, so läßt sich  $\operatorname{Re}$  berechnen.

Tabelle 11

Widerstandsbeiwerte  $c$  für zylindrische Körper mit der Länge  $l$  und dem Durchmesser  $d$  für verschiedene Reynoldszahlen  $\operatorname{Re}$

$d/l$	$\operatorname{Re}$	$c$
1	$\approx 9 \cdot 10^5$	0,63
2		0,68
5		0,74
10		0,82
40		0,98
$\infty$		1,2
$\infty$	$> 5 \cdot 10^4$	0,35

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 9)

Abb. 18: Kräfteverteilung am angeströmten System.  $K$  = effektiver Auftrieb,  $S$  = Seilzug,  $P$  = Strömungswiderstand,  $R$  = Rückstellkraft,  $\alpha$  = Neigungswinkel,  $V$  = Stromgeschwindigkeit.

Abb. 19: Umrechnungsfaktor  $W = \frac{\operatorname{tg} 5^\circ}{\operatorname{tg} \alpha}$  für die Bestimmung des Restauftriebs als Funktion von  $\alpha$

Abb. 20: Darstellung von Strömungswiderständen und zugehörigen Hebelarmen zur Reduktion der Widerstände auf den oberen Endpunkt des Verankerungssystems.

Bei bekannter Reynoldszahl ergeben sich die Widerstandsbeiwerte  $c_D$ ,  $c_S$  und  $c_A$  für Draht, Strommesser und Auftriebsselement (vergl. SASS, BOUCHE und LEITNER, 1963) mit der Länge  $l$  und dem Durchmesser  $d$  des zylinderähnlichen Körpers.

Aus Tab. 11 entnimmt man:

$$c_D = 0,35 \quad (l : d \approx \infty)$$

$$c_S = 0,7 \quad (l : d \approx 10)$$

$$c_A = 0,63 \quad (l : d \approx 1)$$

### 5.3. Strömungswiderstand

Der Gesamtströmungswiderstand  $P$  bei einem starren System setzt sich zusammen aus den Strömungswiderständen des Drahtes  $P_D$ , der  $i$  einzelnen Strommesser  $P_{Sj}$  und der  $n$  Auftriebsselemente  $P_{Aj}$ . Die Gleichung für die Drehmomente lautet mit der Gesamtlänge  $l$  und den entsprechenden Bodenabständen  $\frac{l}{2}$ ,  $x_{Sj}$  und  $x_{Aj}$  (vgl. Abb. 20) für den mittleren Angriffspunkt der Strömung:

$$Pl = P_D \frac{l}{2} + \sum_{j=1}^i P_{Sj} x_{Sj} + \sum_{j=1}^n P_{Aj} x_{Aj}$$

Für den Gesamtströmungswiderstand  $P$  im oberen Endpunkt gilt also:

$$P = \frac{1}{2} P_D + \frac{1}{l} \sum_{j=1}^i P_{Sj} x_{Sj} + \frac{1}{l} \sum_{j=1}^n P_{Aj} x_{Aj} \quad (5)$$

Der Gesamtströmungswiderstand  $P_a$  für den Fall äquidistanter Anordnung der Strommesser und Auftriebsselemente ergibt sich mit

$$x_{Sj} = j x_{S1} = j \frac{l}{i} \quad (6)$$

$$x_{Aj} = j x_{A1} = j \frac{l}{n} \quad (7)$$

aus (5):

$$P_a = \frac{1}{2} P_D + \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i j P_{Sj} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n j P_{Aj} \quad (8)$$

---

Legende zu den nebenstehenden Abbildungen (Tafel 10)

Abb. 21: Erforderlicher Restauftrieb als Funktion der Gesamtseillänge mit der Stromgeschwindigkeit (in m/sec) als Parameter für konstanten Strom in jeder Tiefe.  
 $i = 5$ ,  $n = 5$ ,  $d = 10$  mm,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $a = 0,25$  m<sup>2</sup>,  $b = 0,5$  m<sup>2</sup>.

#### 5.4 Strömungswiderstände bei verschiedenen Stromprofilen und konstanter Stromrichtung

Mit der Stromgeschwindigkeit  $V_D$  bei  $x = \frac{1}{2}$ ,  $V_{Sj}$  bei  $x = x_{Sj}$  und  $V_{Aj}$  bei  $x = x_{Aj}$  und den entsprechend durch Index gekennzeichneten C und F erhält man mit (4) aus (5) bzw. aus (8)

$$P = \frac{\rho}{2} \left( \frac{1}{2} c_D F_D V_D^2 + c_s F_s \frac{1}{l} \sum_{j=1}^i V_{Sj}^2 x_{Sj} + c_A F_A \frac{1}{l} \sum_{j=1}^n V_{Aj}^2 x_{Aj} \right) \quad (9)$$

$$P_a = \frac{\rho}{2} \left( \frac{1}{2} c_D F_D V_D^2 + c_s F_s \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i j V_{Sj}^2 + c_A F_A \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n j V_{Aj}^2 \right) \quad (10)$$

##### 5.4.1. Konstanter Strom

Mit  $V_D = V_{Sj} = V_{Aj} = V$  erhält man aus (10):

$$P_a = \frac{\rho}{2} V^2 \left( \frac{1}{2} c_D F_D + c_s F_s \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i j + c_A F_A \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n j \right) \quad (11)$$

Mit dem Drahtdurchmesser  $d$  und

$$c_s F_s = a$$

$$c_A F_A = b$$

folgt aus (11):

$$P_a = \frac{\rho}{2} V^2 \left( \frac{1}{2} c_D l d + \frac{a}{i} \sum_{j=1}^i j + \frac{b}{n} \sum_{j=1}^n j \right) \quad (12)$$

##### 5.4.2. Linear mit der Tiefe bis Null abnehmender Strom

Das Stromprofil sei gegeben durch:

$$V(x) = V_o \frac{x}{l} \quad (13)$$

Entsprechend gilt für den äquidistanten Fall:

$$V_D = \frac{V_o}{2} \quad (14)$$

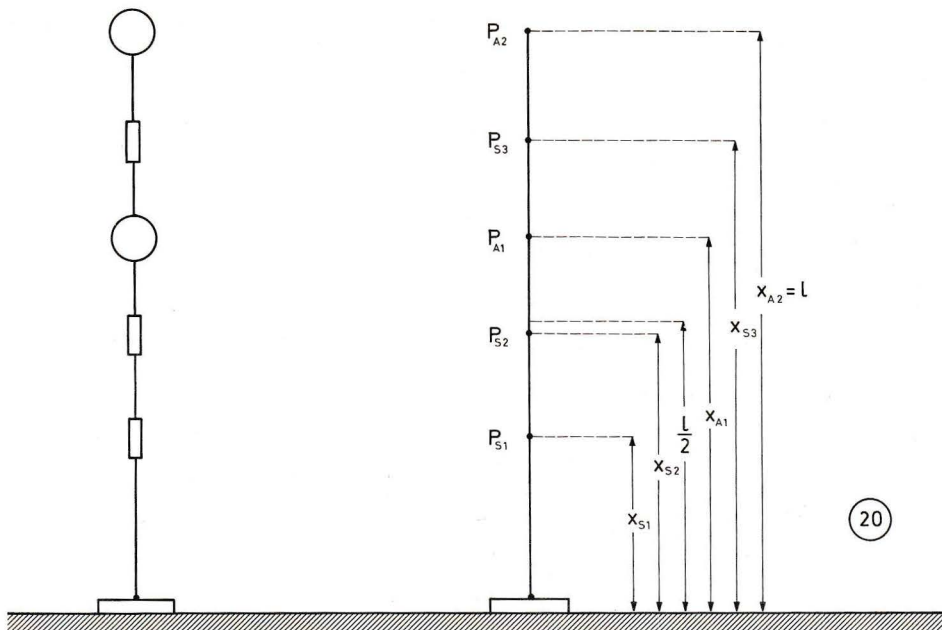
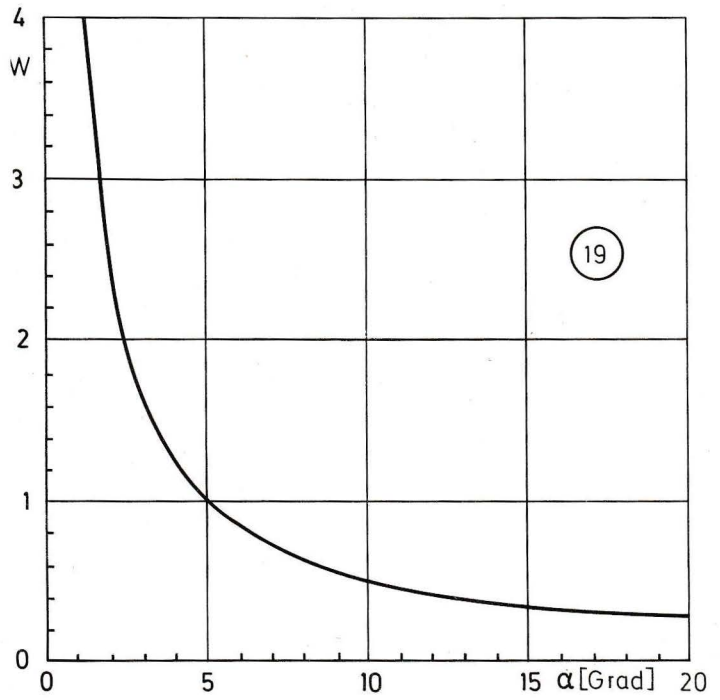
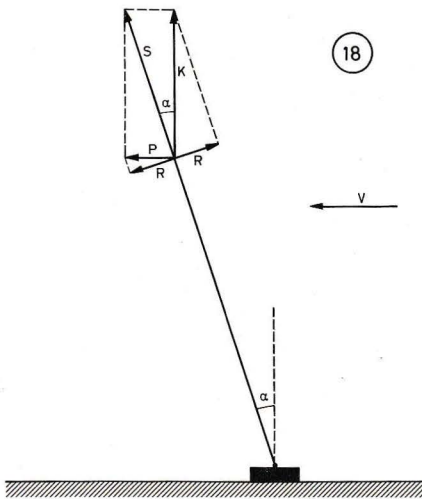
$$V_{Sj} = V_o \frac{x_{Sj}}{l} = V_o \frac{j}{i} \quad (15)$$

---

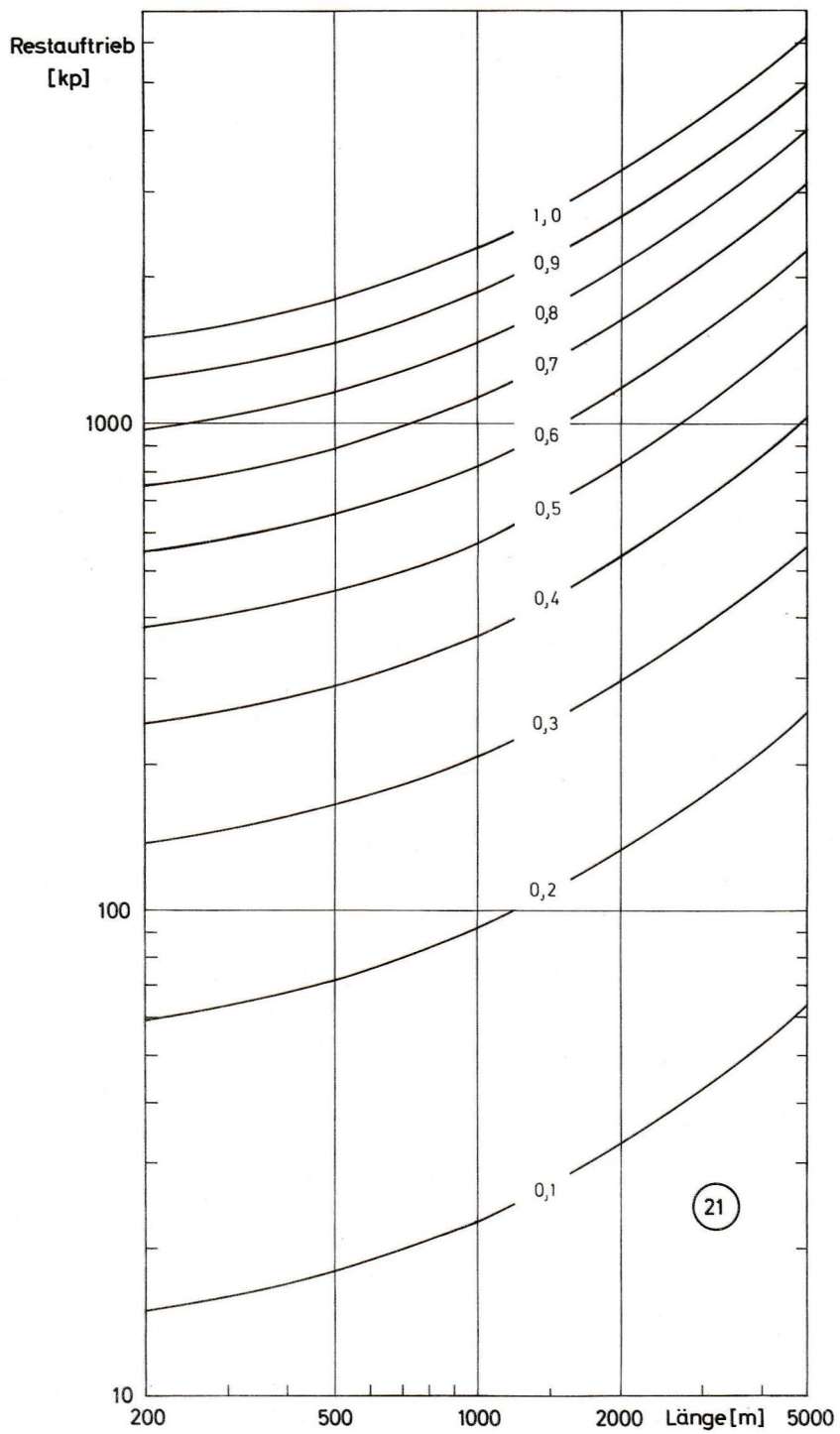
Legende zu der nebenstehenden Abbildung (Tafel 11)

Abb. 22: Erforderlicher Restauftrieb als Funktion der Gesamtseillänge mit der Stromgeschwindigkeit (in m/sec) als Parameter für linear mit der Tiefe abnehmenden Strom.  
 $i = 5$ ,  $n = 5$ ,  $d = 10$  mm,  $\alpha = 5^\circ$ ,  $a = 0,25$  m<sup>2</sup>,  $b = 0,5$  m<sup>2</sup>.

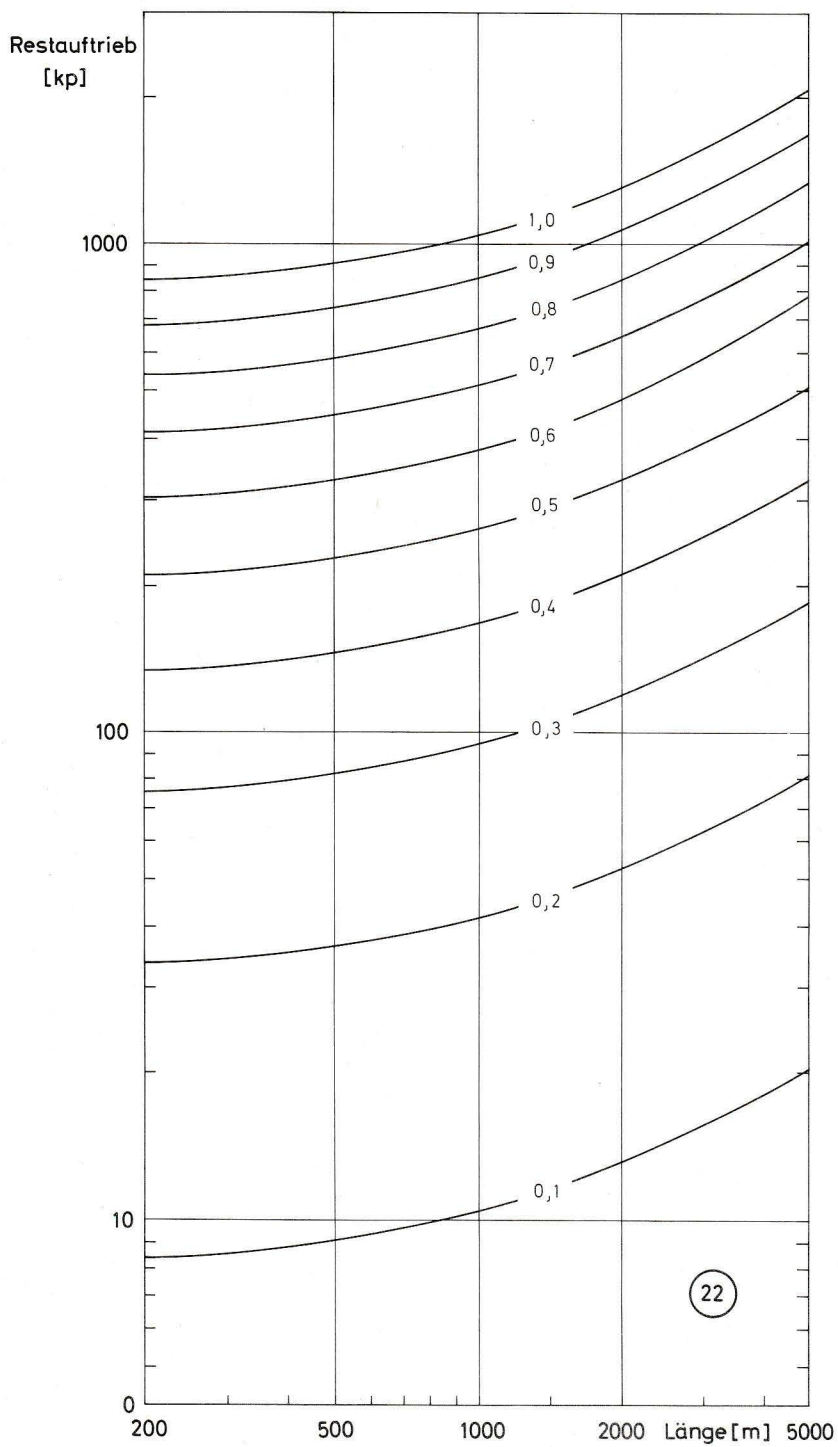




Tafel 9 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)



Tafel 10 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)



Tafel 11 (zu G. Siedler u. G. Graßhoff)



$$V_{Aj} = V_o \frac{x_{Aj}}{l} = V_o \frac{j}{n} \quad (16)$$

Mit (14), (15) und (16) folgt aus (10)

$$P_a = \frac{\rho}{2} \left( \frac{1}{2} c_D F_D \frac{V_o^2}{4} + c_S F_S V_o^2 \frac{1}{i^3} \sum_{j=1}^i j^3 + c_A F_A V_o^2 \frac{1}{n^3} \sum_{j=1}^n j^3 \right)$$

$$P_a = \frac{\rho}{2} V_o^2 \left( \frac{1}{8} c_D l d + \frac{a}{i^3} \sum_{j=1}^i j^3 + \frac{b}{n^3} \sum_{j=1}^n j^3 \right) \quad (17)$$

#### 5.4.3. Notwendiger effektiver Auftrieb

Der erforderliche Restauftrieb  $K$  für ein Verankerungssystem mit einer beliebigen Anzahl von äquidistanten Auftriebs-elementen und Strommessern und konstantem oder linear zum Boden abnehmendem Strom bei einem vorgegebenen Auslenkwinkel ergibt sich aus (3) mit (12) bzw. (17).

Für verschiedene Längen  $l$  und Stromgeschwindigkeiten  $V$  bzw.  $V_o$  bei einem Auslenkwinkel von  $\alpha = 5^\circ$  und  $i = 5$ ,  $n = 5$  und  $d = 10$  mm sind in den Abb. 21 und 22 die erforderlichen Restauftriebswerte angegeben.

Für beliebige Winkel  $\alpha$  gilt die Beziehung:

$$\frac{K(\alpha)}{K(5^\circ)} = \frac{\tan 5^\circ}{\tan \alpha}$$

Mit  $W = \frac{\tan 5^\circ}{\tan \alpha}$  erhält man:

$$K(\alpha) = W \cdot k(5^\circ) \quad (18)$$

Werte für  $W$  können aus Abb. 19 entnommen werden.

Allen Mitarbeitern der Abteilung für Meeresphysik des Instituts für Meereskunde Kiel sowie Herrn Kapitän W. Wruck und der Besatzung des Forschungsschiffes „Planet“ sei an dieser Stelle für die wertvolle Unterstützung gedankt. Ferner gilt unser Dank den Mitarbeitern des Geophysikalischen Instituts der Universität Bergen/Norwegen für die Durchführung der Auftriebs-element-Testversuche.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden teilweise mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft durchgeführt.

# Literaturverzeichnis

BERTEAUX, H. O., and R. G. WALDEN (1968): The mooring wire testing and evaluation programs for 1968. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mass., Technical Memorandum No. 7—68 (unpublished manuscript). — BERTEAUX, H. O. (1968): Surface moorings, review of performance. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mass., Technical Report Ref. No. 68—20, (unpublished manuscript). — BERTEAUX, H. O., and R. G. WALDEN (1969): Analysis and experimental evaluation of single point moored buoy systems. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mass., Technical Report Ref. No. 69—36 (unpublished manuscript). — FOFONOFF, N. P., and J. GARRET (1968): Mooring motion. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mass., Technical Report Ref. No. 68—31 (unpublished manuscript). — HEINMILLER, R. H. (1968): Acoustic release systems. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mass., Technical Report Ref. No. 68—48 (unpublished manuscript). — MILLARD, R. D., Jr. (1969): Observations of static and dynamic tension variations from surface moorings. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mass., Technical Report Ref. No. 69—29 (unpublished manuscript). — SASS, F., BOUCHE, CH., and A. LEITNER (1963): *Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau*, Berlin, 306. — SIEDLER, G. (1962): Die Zugbeanspruchung des Einleiterkabels bei Bathysondenmessungen in der Tiefsee (Technischer Bericht), *Kieler Meeresf.* 28 (1), 34—35. — SIEDLER, G. (1967): Mooring Systems Used in the Eastern Atlantic. *Transactions, 2nd International Buoy Technology Symposium*, Marine Technology Society, Washington, D. C., 77—83. — SIEDLER, G. (1968): Schichtungs- und Bewegungsverhältnisse am Südausgang des Roten Meeres. *Meteor-Forschungsergebnisse*, Reihe A, Nr. 4, 1—76.